



А.Г. ГАРГАНЕЕВ

**СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



А.Г. ГАРГАНЕЕВ

**СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ОТВЕТСТВЕННЫХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**



Учебное пособие

ТОМСК
2010

УДК 621.31.03(075.8)

ББК 31.29-5я73

Г20

Гарганеев А.Г.

Г20 Системы аварийного электроснабжения ответственных потребителей переменного тока: учебное пособие / А.Г. Гарганеев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. – 190 с.

ISBN 978-5-98298-666-5

В пособии рассмотрены вопросы построения систем бесперебойного электропитания (СБЭП) ответственных потребителей переменного тока на основе полупроводниковых преобразователей; особенности взаимодействия СБЭП и дизель-генераторных станций; методы формирования выходного напряжения в автономных инверторах способом широтно-импульсной модуляции. Проанализирована работа ответственных электропотребителей различных технологических процессов; приведены сведения о современных системах мониторинга СБЭП; значительное место отведено химическим источникам тока как элементу СБЭП.

Предназначено магистрантов, обучающихся по направлениям «Электро-механика, электротехника и электротехнологии» И «Автоматизация и управление», а также может быть полезно специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией СЭП на основе статических преобразователей частоты и напряжения.

УДК 621.31.03(075.8)

ББК 31.29-5я73

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ТПУ

В.И. Гончаров

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
НИИ автоматики и электромеханики ТУСУРа

И.В. Целебровский

ISBN 978-5-98298-666-5

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010

© Гарганеев А.Г., 2010

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

Организация ряда технологических процессов (ТП) в различных областях современной человеческой жизни — в промышленном производстве, на транспорте, объектах военного назначения, в медицине, связи и т. п. — непосредственно связана с потреблением и преобразованием электроэнергии. При этом качество ТП и, как следствие, его конечный продукт во многом определяются параметрами используемой электроэнергии. Организация электроснабжения, адекватного по качеству конечному продукту ТП, приводит к необходимости исследования, проектирования и применения специальных статических систем электропитания (СЭП), выходные параметры которых отличаются от параметров промышленных сетей. Центральным блоком таких СЭП является полупроводниковый статический преобразователь (СП), построенный на основе автономных инверторов напряжения (АИН). При этом преобразование энергии предполагает наличие первичного источника и возможность автономной работы.

Ряд специальных электропотребителей в непрерывных и сложных ТП можно назвать также «ответственными», поскольку для них непростительны даже кратковременный перерыв в электроснабжении.

Системы бесперебойного питания (СБЭП), как разновидность специальных СЭП, появились в 70-х годах XX столетия, что было обусловлено возросшими требованиями к качеству питающего напряжения и развитием полупроводниковой техники. За тридцать с небольшим лет развития СБЭП превратились в интеллектуальные системы силовой электроники с микропроцессорным управлением. В настоящее время СБЭП выделяются в отдельный класс устройств со своей топологией, терминологией и классификацией и позволяют удовлетворить требования разнообразных электропотребителей.

На протяжении целого ряда лет автором данного учебного пособия в отделе № 13 «Статические преобразователи частоты и напряжения» Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ) г. Томска в составе творческого коллектива проводились исследования и разработка систем электропитания ответственных потребителей. Практически все применяемые ныне в мировой практике топологии СБЭП, а также методы формирования ШИМ, были исследованы сотрудниками НИИ АЭМ в период 70–90-х годов прошлого столетия. На основании проведенных исследований сотрудниками

НИИ АЭМ было спроектировано и передано в промышленную эксплуатацию свыше сотни СБЭП различного назначения, наибольшую составляющую из которых имеют СБЭП хирургических и реанимационных отделений медицинских учреждений. Справедливо отметить, что многие вопросы теории и практики СБЭП переменного тока во многом перекликаются с вопросами управляемого электропривода, поскольку любую электромеханическую систему можно рассматривать как СЭП для электродвигателя, реализующую специфические законы управления напряжением, частотой, алгоритмы широтно-импульсной модуляции, синхронизации и т. п.

Данное учебное пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлениям «Электромеханика, электротехника и электротехнологии», «Автоматизация и управление», а также может быть полезно специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией СЭП на основе статических преобразователей частоты и напряжения.

Глава 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

1.1. Ответственные потребители электрической энергии. Общая характеристика функционирования промышленных сетей

Конкретизируя определение «ответственный» потребитель, отметим, что этим термином называется такой потребитель, нарушение электропитания которого может привести:

- к осложнениям здоровья людей, вплоть до летального исхода;
- аварийным ситуациям в ТП, ведущим:
 - к экологическим бедствиям;
 - серьезным экономическим убыткам.

Бесперебойность и высокое качество питающего напряжения являются необходимым условием нормальной работы разнообразных потребителей электроэнергии, участвующих в различных ТП. Работа вычислительных центров или отдельных машин, входящих в систему автоматизированного управления (АСУ) ТП, комплексов контрольно-измерительных приборов промышленных производств и автономных объектов; проведение хирургических операций и реанимационных мероприятий в медицине; управление и слежение за движущимися объектами; функционирование систем связи или передачи информации, проведение межбанковских расчетов, автоматизация транспорта нефтепродуктов — вот далеко не полный перечень ТП, требующих особого внимания к организации их бесперебойного электропитания.

Особые потребители и субъекты электроэнергетики определены в рамках разрабатываемого в России технического регламента «О безопасности при нарушениях электроснабжения» [1]. К ним относятся:

а) объекты электроэнергетики и объекты потребителей, которые должны продолжать функционирование, несмотря на прекращение внешнего электроснабжения, неограниченное время либо до окончания их собственного производственного процесса или выполнения заданных им функций (категория А):

- объекты военного и стратегического назначения;
- объекты использования атомной энергии;
- объекты (здания, сооружения и иные объекты), непосредственно используемые органами государственной власти при осуществлении ими своих полномочий;
- объекты систем диспетчерского управления на железнодорожном, водном и воздушном транспорте;
- системы централизованного теплоснабжения;
- системы децентрализованного теплоснабжения от тепловых станций;
- системы пожаротушения;
- системы водоснабжения и канализации;
- объекты по производству электрической энергии, объекты сетевого хозяйства, объекты, используемые в процессе оперативно-диспетчерского управления;
- медицинские учреждения, имеющие реанимационные отделения, палаты интенсивной терапии; родильные дома;
- объекты пенитенциарной системы;
- лифтовое оборудование зданий (свыше 30 этажей);
- объекты систем оповещения населения о чрезвычайных ситуациях;
- автомобильные туннели протяженностью более 500 м;
- объекты регулирования автомобильного движения в городах;
- системы аварийного освещения улиц и высотных зданий в городах;
- гидротехнические сооружения различного назначения;

б) объекты потребителей, функционирование которых при нарушении внешнего электроснабжения должно прекращаться с обеспечением безопасного и безаварийного останова производственного процесса (категория Б):

- промышленные предприятия, на которых внезапное нарушение производственного процесса может привести к пожару, взрыву, выбросу ядовитых веществ, загрязнению окружающей среды и пр. (согласно руководящему документу Госгортехнадзора России РД-03-260-99 «Методические указания по идентификации опасных производственных объектов»);
- объекты производства взрывчатых веществ и боеприпасов с непрерывным технологическим процессом;
- объекты вентиляции, водоотлива и основные подъемные устройства угольных и горнорудных предприятий;
- метрополитен.

За каждым в представленном выше перечне потребителем стоит свой ТП.

В связи с этим справедливо заметить, что некоторые потребители, как из категории «А», так и «Б», не допускают перерыва в электроснабжении и должны быть снабжены системами бесперебойного электропитания (СБЭП), а некоторые допускают временные перерывы при автоматических переключениях на резервный источник питания и должны быть снабжены системами гарантированного электропитания – СГЭП.

Данные по некорректному функционированию промышленных сетей на территории страны труднодоступны. Тем не менее попытаемся проанализировать качество функционирования сетей в ретроспективе.

Основываясь на исследованиях, проведенных в 70-е годы в Англии, Германии, США, Финляндии, Швеции и Японии, можно отметить, что длительные исчезновения напряжения в сети (более 1 ч) происходили 0,5 раз в год, непродолжительные (1 мин – 1 ч) – 1–3 раза в год, кратковременные (1 с) – 1–3 раза в месяц, мгновенные (длительностью 1–2 периода) 1–10 раз в день. В среднем считается, что общий перерыв составлял 4...20 ч в год и возникал примерно один раз в год на одном километре линии электропередач [2]. По данным [2, 3], на территории бывшего СССР возникало:

- 1) повреждение одного или нескольких элементов и локализация поврежденного участка устройствами релейной защиты автоматики без отключения существенной части потребителей и деления энергосистем; таких событий происходило более 100 000 (!) ежегодно;
- 2) отказ релейной защиты или выключателя и локализация аварии резервной защитой, автоматикой и устройством резервирования отказов выключателей (приблизительно 0,05 % всех повреждений);
- 3) нарушение синхронизма по одному сечению с ресинхронизацией или делением без существенного отключения нагрузки (несколько сотен раз ежегодно);
- 4) каскадное нарушение синхронизма, которое ликвидируется устройствами делительной автоматики и не сопровождается существенным отключением нагрузки (несколько событий в году);
- 5) отключение части нагрузки автоматикой при понижении частоты или напряжения (несколько десятков событий в год);
- 6) дополнительная потеря значительной мощности тепловых электростанций (несколько событий ежегодно);
- 7) длительный асинхронный ход, вследствие того что не произошла ресинхронизация и отказала делительная автоматика или выключатель (единичные события);

8) длительное понижение напряжения в основной сети, вследствие того что не отключались участки короткого замыкания, нарушалась устойчивость части нагрузки и т. п. (единичные события);

9) разделение энергосистем или энергообъединения на отдельные части с погашением ряда электростанций и отключением значительной части потребителей (более 10 %) (редкие события).

Причинами, вызывающими возникновение и развитие аварийных ситуаций, являются: отключение линий электропередач или автотрансформаторов; отказ или неправильные действия релейной защиты и противоаварийной автоматики; отключение или снижение мощности блока, котла собственных нужд электростанции; повреждение или отказ оборудования; неправильные действия оперативного или ремонтного персонала, персонала службы релейной защиты и автоматики; медленное превышение предела передаваемой мощности из-за нарастания нагрузки и опоздания в ограничении потребителей. Кроме того, возникновение аварийных ситуаций может быть связано с короткими замыканиями при грозе, пожаре, ветре, набросах посторонних предметов на линии электропередач и т. п. Кратковременные колебания напряжения могут создавать также мощные приводные электродвигатели подъемников, компрессоров в момент включения; сварочные агрегаты; переключение батарей конденсаторов и т. д.

С распадом СССР ситуация с качеством функционирования промышленных сетей на территории России ввиду экономического спада производства, разрушения хозяйственных связей, тотальных неплатежей за электроэнергию и т. п., к сожалению, изменилась в худшую сторону. Так, по данным Института экономики Уральского отделения РАН и Уральского государственного технического университета [4], на начало 1999 года ситуация с энергетической безопасностью в 5 из 11 экономических районов России оценивалась как критическая. По субъектам Федерации картина представлялась еще более мрачной: из 77 субъектов 69 (т. е. 90 %) находились в кризисном состоянии. В дополнение следует отметить, что интенсивно и резко изменяющиеся в последние годы погодные условия также усугубляют неблагоприятное положение. По данным авторов данной монографии, эта статистика подтверждается и на территории Западной Сибири. Так, например, в больницах г. Томска и Томской области за 1992—1998 гг. электроэнергия в отделениях хирургии и реанимации отсутствовала в среднем 2—5 раз в год при продолжительности отключения от нескольких минут до 2 ч, а в отдельных случаях (пожар, авария тепло- и водоснабжения внутри помещения) до

4...6 ч; плановые отключения с предупреждением медперсонала — до 6 ч [5]. Только за период 1995—2000 гг. в медучреждениях г. Томска и Томской области было зафиксировано более 60 случаев отключения электроэнергии, причем из них около 25 % совпало с проведением операций и реанимационных мероприятий. Аналогичная ситуация наблюдается и в соседних областях. При этом, несмотря на требования к объектам первой категории (пп. 1.2.17; 1.2.18, см. «Правила устройства электроустановок»), подавляющее число медучреждений не имеет обязательных резервных источников электропитания. Однако, и при наличии резервных источников в виде автоматизированной дизельной электростанции перерывы в электроснабжении могут быть устранены в лучшем случае в течение 10...30 с, а при наличии двух вводов от независимых электрических промышленных подстанций с применением электромеханических устройств автоматического включения резерва (АВР) — в течение 0,3...0,7 с. Этого может быть недостаточно для электропитания ответственных потребителей категории «А», совершенно не допускающих временных перерывов в электроснабжении.

1.1.1. Ответственные медицинские электроприборы и особенности работы экстренных медицинских отделений

Работа электроприборов экстренных медицинских отделений (операционных блоков, реанимационных, родильных и токсикологических) невозможна без качественной электроэнергии, внезапное отсутствие которой может привести к осложнению состояния здоровья пациентов, а в некоторых случаях к летальному исходу. Только в 1995—1998 гг. по этой причине в ряде больниц России произошло 6 инцидентов с трагическим исходом, о которых сообщалось в средствах массовой информации (Приморский край, Горьковская ЦРБ Омской обл., Прокопьевская больница Кемеровской обл., ряд медучреждений европейской части России). Случаев же отключения электроэнергии, осложняющих работу медперсонала в условиях оказания экстренной помощи пациентам, в десятки и сотни раз больше вышеуказанных. Кроме того, развитие медицинской техники, позволяющей применение новых технологий проведения хирургических операций и реанимационных мероприятий (эндохирургия, непрерывный компьютерный мониторинг состояния пациента, экстренные клинические лаборатории и т. д.), предъявляет новые требования к качеству систем электроснабжения [5—7]. В этом смысле существующие до сих пор в оперблоках в качестве источника аварийного электроснабжения свинцово-ки-

слотные аккумуляторы с зарядными устройствами не только не отвечают требованиям экологической чистоты, долговечности, удобства обслуживания, но и не способны снабжать в аварийных ситуациях электроэнергией аппаратуру, работающую на переменном токе (аппараты искусственной вентиляции легких, отсосы, коагуляторы, дефибрилляторы, кюезы, различные мониторы и т. д.).

В условиях низкого качества и надежности существующих электросетей, «ведомственности» подстанций для обеспечения независимости от случайных стечений обстоятельств, стихийных бедствий и т. п. в каждом экстренном отделении необходимо иметь свою систему аварийного электроснабжения, а техническую оснащенность отделения рассматривать в комплексе «медицинские приборы — аварийная система электроснабжения».

Современная система аварийного электроснабжения должна:

- 1) учитывать «технологические» особенности работы экстренных медицинских отделений, для чего разработчик систем хотя бы в общем виде должен представлять технологию и средние длительности различных хирургических операций и реанимационных мероприятий;
- 2) соответствовать характеристикам применяемой аппаратуры;
- 3) обладать автономностью и обеспечивать необходимое время работы в автономном режиме (функционировать даже в случаях, когда другие виды внешнего аварийного электроснабжения — дизель-генератор или резервный кабель — принудительно отключаются, например при пожаре или аварии водо- или теплоснабжения);
- 4) обладать приемлемыми массогабаритными показателями для удобства размещения, а в случае необходимости относительно быстрого перемещения силами персонала;
- 5) позволять быстрый ввод в действие без реконструкции действующей электропроводки и дополнительных капитальных вложений;
- 6) быть надежной, долговечной, экологически чистой в эксплуатации;
- 7) не обременять персонал обслуживанием, основной принцип автоматических систем «установил—включил—забыл».

Требования 1—7 приводят к необходимости учета при проектировании системы аварийного электроснабжения следующих аспектов: энергетического, мощностного, технического качества выходных параметров, надежностного, стоимостного, экологического. Из данных аспектов начальными в проектировании являются, безусловно, энергетический и мощностной.

Энергетический аспект проектирования СБЭП медицинского назначения должен исходить из следующего основного тезиса: «каждый вид хирургической операции и реанимационного мероприятия имеет свою энергетическую "стоимость", или "емкость", измеренную в Дж или кВт·ч» [7, 8].

При этом энергетический расчет конкретных операций и реанимационных мероприятий должен исходить из технологических особенностей их проведения — учитываются все возможные режимы работы сочетаний различной медицинской аппаратуры, которую условно можно классифицировать следующим образом:

1) осветительная (бестеневые лампы, переносные светильники, головные светильники);

2) регистрирующая (мониторы для измерения пульса, давления, температуры, электрокардиографы, ультразвуковая аппаратура и т. д.);

3) «технологическая» (электронож-коагулятор, электроотсос, наркозный аппарат, электропила, электросверло, эндоскопическая аппаратура);

4) «жизнеподдерживающая» (аппарат искусственной вентиляции легких, насосы, дефибриллятор, «искусственная почка», кардиостимулятор, кювез для новорожденных, барокамера);

5) информационно-диагностическая (приборы экстренной диагностики в клинических лабораториях, сюда же можно отнести центрифуги, рентгеновские аппараты, компьютеры, интеллектуальные аппараты ИВЛ с микропроцессорным управлением).

Мощность медицинских приборов, задействованных при проведении хирургических операций или реанимационных мероприятий в отделениях интенсивной терапии, определяет мощность системы аварийного электроснабжения. Как показывает практика, в экстренных случаях пропадания электроэнергии и при неблагоприятном стечении обстоятельств пиковая электрическая нагрузка отделений интенсивной терапии составляет не более 5 кВА, операционных с эндоскопической аппаратурой — 4 кВА. Оснащенность центральных районных больниц (ЦРБ), как правило, хуже, загруженность отделений больными меньше и, как правило, пиковая нагрузка аналогичных отделений по мощности не превышает значения, соответственно, 2 кВА и 1,5 кВА. Обычная электрическая нагрузка родильного отделения, как правило, редко превышает значение 0,5...1 кВА, а отделения реанимации новорожденных — 1,5...2 кВА.

При прочих равных условиях наибольшей загрузкой по мощности обладают отделения интенсивной терапии с интеллектуальными аппаратами ИВЛ (типа «Drager» и т. п.), хирургические операционные с эндоскопической аппаратурой и отделения с аппаратурой типа «искусственная почка».

В табл. 1.1 представлена средняя продолжительность наиболее характерных хирургических операций различного профиля и реанимационных мероприятий, а также соответствующая им средняя «энергоёмкость».

Как видно из табл. 1.1, наибольшей энергоёмкостью обладают хирургические операции нейрохирургического и кардиологического профиля. Что касается реанимационных мероприятий, то их продолжительность при применении современных аппаратов ИВЛ в исключительных случаях может достигать до нескольких месяцев.

Особенности применения медицинской аппаратуры при проведении хирургических операций и реанимационных мероприятий определяются набором соответствующих технологических приемов в хирургии и реаниматологии и назначением этой аппаратуры. Прежде всего следует классифицировать аппаратуру по времени рабочего режима. Для следующих видов аппаратуры характерны режимы [7, 8]:

1) *длительный*: хирургические бестеневые лампы, головные светильники, аппараты ИВЛ, эндоскопическая аппаратура, мониторы для измерения пульса, давления, аппарат искусственного кровообращения, гемофильтрации, газоанализатор, электрокардиограф, электронасос, микроскоп, кювез, барокамера;

2) *повторно-кратковременный*: электронож-коагулятор, электроотсос, электродрель, электропила, лазер, электрокардиограф;

3) *кратковременный*: дефибрилятор, рентгеновские установки.

Следует отметить, что некоторые виды аппаратуры длительного использования (эндоскопическая, кювез) в процессе работы на фоне стабильного токопотребления имеют свои повторно-кратковременные режимы ввиду изменения вида функций (разрез-коагуляция; нагрев-охлаждение).

Таблица 1.1

*Средняя продолжительность и энергоемкость
хирургических операций*

№	Профиль хирургических операций и реанимационных мероприятий	Применяемая медаппаратура	Средняя продолж. (ч)	Средняя энергоемк. (кВт·ч)
1	Костные операции в травматологии	Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; электросверло; электропила; отсос; монитор	1,5...2	1,2...1,8
2	Операции на груд. клетке: • легкие; • сердце; • позвоночник	Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; электропила; отсос; монитор. Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; электропила; отсос; монитор; аппарат искусств. кровообращения. Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; электропила; отсос; монитор	2...2,5 6 2...3	1,8...2,2 3...4 2...3
3	Операции на брюшной полости (без применения эндоскопич. аппаратуры)	Аппарат ИВЛ; операц. лампа; отсос; монитор	2 (опухоли – до 5 ч)	2...3
4	Нейрохирургические операции	Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; головные светильники; монитор	до 6...8	3...4
5	Урологические операции	Аппарат ИВЛ; коагулятор; операц. лампа; отсос; монитор	2...2,5	1,8...2,5
6	Глазные операции	Операц. лампа; головные светильники; микроскоп; лазер	2	0,8...1,2
7	Операции с применением эндоскопической аппаратуры	Аппарат ИВЛ; электронож-коагулятор; операц. лампа; монитор; отсос; инфулятор; морцеллятор; осветитель; видеокамера	1...2	2,0...2,5
8	Реанимационные мероприятия – общие (новорожденных)	Аппарат ИВЛ; отсос; мониторы; центрифуга; газоанализатор; насос. (+кювез-инкубатор)	24...72 (24...72)	4...12 (4...50)

На рис. 1.1 представлена характерная временная диаграмма токопотребления операционной при проведении эндопротезирования тазобедренного сустава. Диаграмма характеризуется хаотичным повторно-кратковременным режимом работы потребителей различного типа.

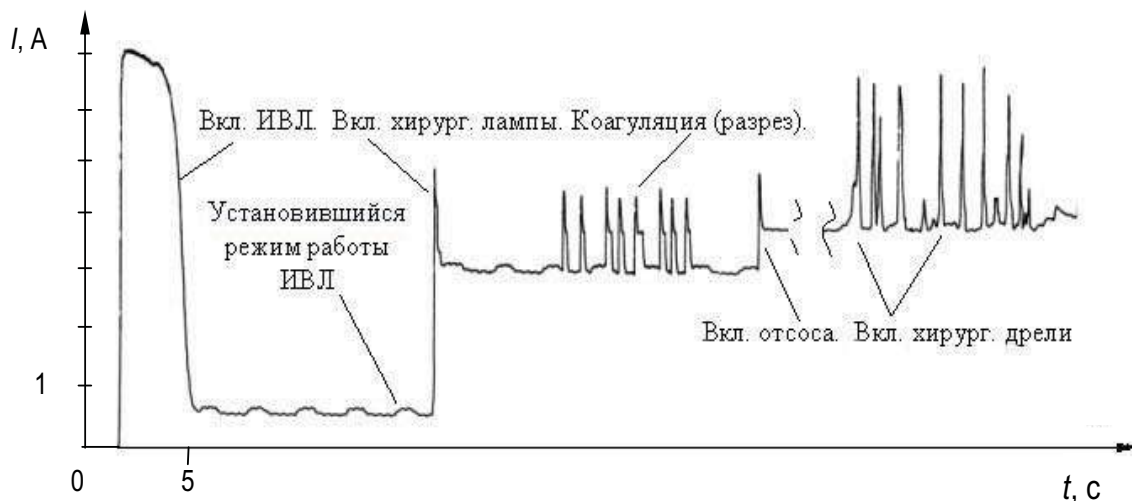


Рис. 1.1. Диаграмма токопотребления хирургической операционной при проведении эндопротезирования тазобедренного сустава

Рассмотрим применяемые в медицине типы электропотребителей с точки зрения электрической нагрузки, полагая, что современная медицинская аппаратура по своему элементному многообразию и типам электромагнитных процессов, протекающих при взаимодействии с системой питания, «перекрывает» весь известный спектр нагрузок, применяемых в ответственных ТП иных отраслей производства, транспорта, связи и т. п. Действительно, вышеуказанная аппаратура представляет собой по характеру весьма широкий спектр нагрузок [8].

1. По «комплексному» характеру нагрузки варьируются от слабеемкостной до существенно индуктивной.

2. Кроме нагрузок «пассивного» типа, существуют нагрузки электромеханического типа — электродвигатели: асинхронные конденсаторные, коллекторные переменного тока (аппараты ИВЛ, электроотсосы, электронасосы, центрифуги, компрессоры, холодильники).

3. Существуют нагрузки «существенно нелинейные», сильно искажающие потребляемый от сети ток (электродрели с тиристорными регуляторами; ИВЛ с увлажнителем и несимметричным потреблением переменного тока по полупериодам, однофазные конденсаторные двигатели компрессоров).

4. Ряд нагрузок обладает большими значениями отношения пускового тока к номинальному (то же в переходных режимах при возможных коммутациях сетей).

5. Ряд приборов очень чувствительны к электромагнитным помехам (в частности, кардиографы).

6. Существуют нагрузки как не критичные при перерыве электропитания, так и критичные (интеллектуальные ИВЛ, работающие с компьютерами; газоанализаторы; приборы экстренной диагностики клинических лабораторий; эндоскопическая аппаратура).

Дополнительная важная особенность состоит в том, что указанные виды аппаратуры работают параллельно от одной сети, что в условиях применения аварийной системы электропитания ограниченной мощности может играть существенное значение для устойчивой работы всего хирургического или реанимационного комплекса.

В табл. 1.2 представлена характеристика основных типов медицинских приборов. При этом выделена нагрузка следующих видов:

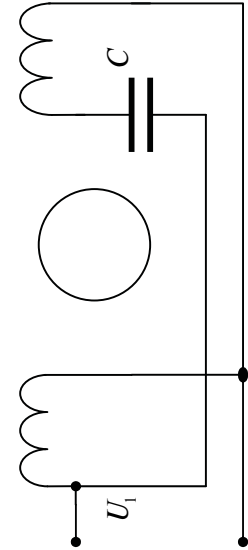
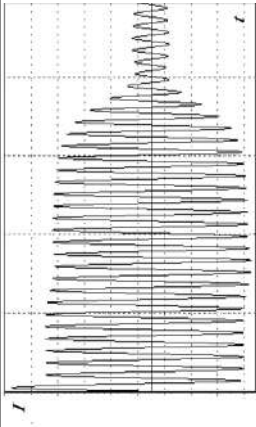
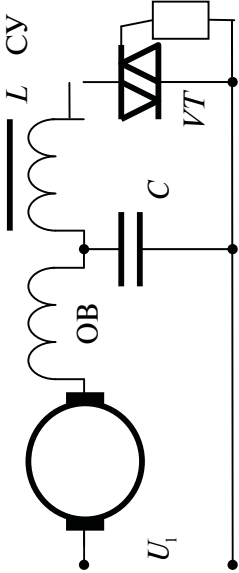
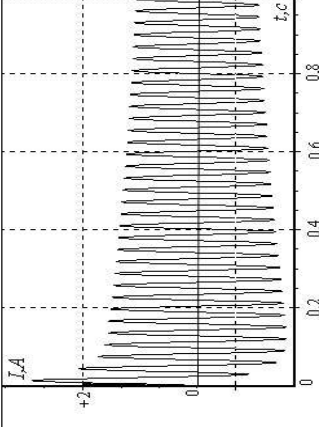
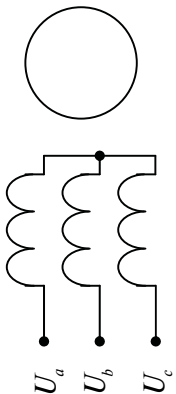
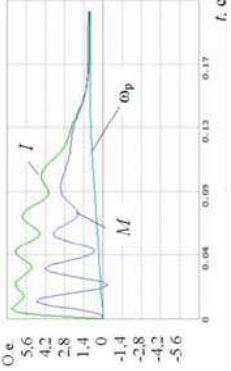
- трансформаторная с активной нагрузкой;
- трансформаторно-выпрямительная с емкостным фильтром и активной нагрузкой;
- выпрямительная с емкостным фильтром и вторичным источником питания;
- двигательная с однофазным асинхронным конденсаторным двигателем;
- двигательная с коллекторным двигателем переменного тока;
- двигательная с трехфазным асинхронным двигателем.

Рассмотрение динамических процессов при включении представленных цепей в сеть, переключении с одной сети на другую, а также резком изменении установившегося режима работы представляет интерес для правильного проектирования СБЭП, поскольку значения тока в переходные режимы могут существенно превышать номинальные значения. Кроме того, нагрузка может потреблять несимметричный и несинусоидальный ток, что также необходимо учитывать при проектировании СБЭП.

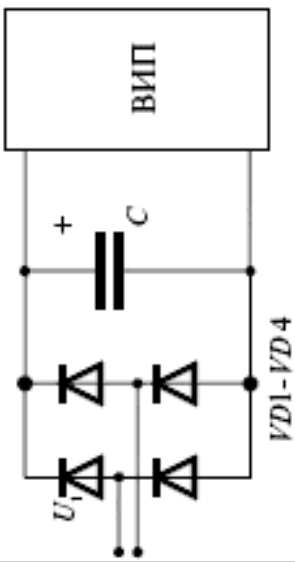
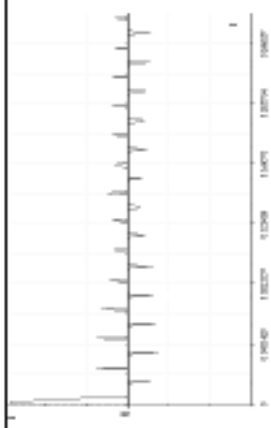
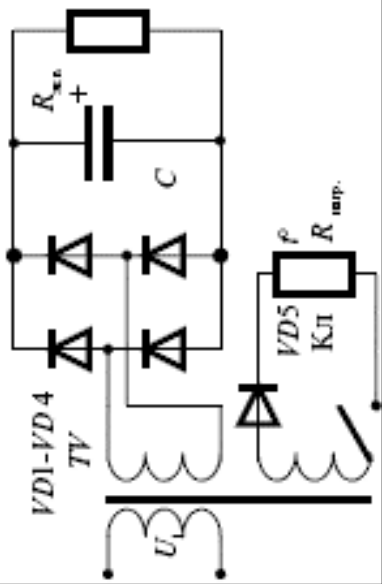
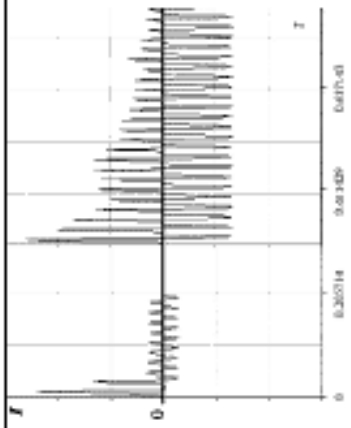
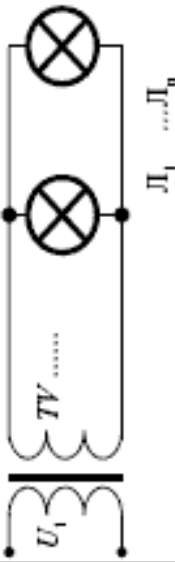
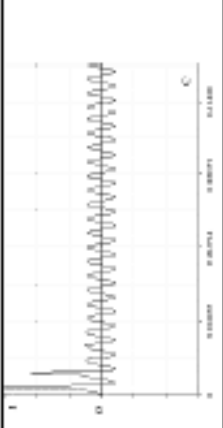
Рассмотрим динамические процессы нагрузки трансформаторного типа на примере однофазного двухобмоточного трансформатора электрокоагулятора.

Уравнения, описывающие динамические процессы в двухобмоточном трансформаторе, можно представить в виде системы матричных уравнений [9]:

Таблица 1.2
Характеристика основных типов медицинских приборов с точки зрения электрической нагрузки

№	Тип нагрузки	Принципиальная схема	Назначение	Вид переходного процесса при включении в сеть	Кратность пуск. тока
1	Двигательная с однофазным асинхронным двигателем		Аппараты ИВЛ; гемо-фильтрации; электроотсос, вентилляторы		5
2	Двигательная с однофазным коллекторным двигателем		Электро-сверло; электропила		До 5
3	Двигательная с трехфазным асинхронным двигателем		Компрес-сор водо-подготовки аппарата «искусствен. почка»		До 7

Окончание табл. 1.2

4	1	2	3	4	5
	Выпрямительная с емкостным фильтром и вторичным источником питания (ВИП)		Мониторы; компьютеры; эндоскопич. аппаратура и др.		До 10
5	Трансформаторно-выпрямительная с емкостным фильтром и активной нагрузкой		Коагуляторы; мониторы; неонат. стол и др.		До 10
6	Трансформаторная с активной нагрузкой		Операцион. лампы; микроскоп и др.		До 6

$$\frac{d[\psi]}{dt} = [u] - [R] \cdot [L_c]^{-1} \cdot [\psi], \quad (1.1)$$

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_o]^{-1} \cdot \{[u] - [R] \cdot [i]\}, \quad (1.2)$$

где матрицы переменных – потокосцеплений $\psi_{1,2}$, напряжений $u_{1,2}$ и токов $i_{1,2}$ – содержат по два элемента, соответствующих первичной и вторичной обмоткам:

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}; \quad [u] = \begin{bmatrix} u_1 \\ -u_2 \end{bmatrix}; \quad [i] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix};$$

матрица активных сопротивлений первичной и приведенной вторич-

ной обмоток трансформатора $[R] = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix}$; матрицы статической и дина-

мической индуктивностей:

$$[L_c] = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1c} + M_c & M_c \\ M_c & L_{\sigma 2c} + M_c \end{bmatrix}; \quad [L_d] = \begin{bmatrix} L_{\sigma 1d} + M_d & M_d \\ M_d & L_{\sigma 2d} + M_d \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

При этом полные индуктивности первичной и приведенной вторичной обмоток выражаются как

$$L_{1c} = L_{\sigma 1c} + M_c, \quad L_{1d} = L_{\sigma 1d} + M_c, \quad L_{2d} = L_{\sigma 2d} + M_d, \quad L_{2c} = L_{\sigma 2c} + M_d, \quad (1.4)$$

где M_c , M_d – статическая и динамическая взаимные индуктивности между обмотками; $L_{\sigma 1c}$, $L_{\sigma 1d}$, $L_{\sigma 2c}$, $L_{\sigma 2d}$ – соответственно статические и динамические индуктивности рассеяния первичной и приведенной вторичной обмоток. При этом статическая индуктивность характеризуется тангенсом угла наклона секущей, проходящей через j -ю точку кривой намагничивания, а динамическая – тангенсом угла наклона касательной в этой точке.

Введение в матричные уравнения (1.1, 1.2) статических и динамических индуктивностей, зависящих от соответствующих токов, необходимо для более точного определения динамических ударных токов при возможных коммутациях трансформатора. При принятии постоянства индуктивностей рассеяния обмоток взаимная индуктивность может быть задана с помощью зависимости, определяющей вид кривой намагничивания материала сердечника $\psi = F(i)$. Для расчета статической

и динамической индуктивностей взаимной индукции нелинейная функция $\psi = F(i)$ была представлена в табличном виде.

На рис. 1.2, 1.3 представлены результаты расчета процесса включения трансформатора электрокоагулятора мощностью 2,0 кВА (сталь Э41) в сеть при различных фазах j первичного переменного напряжения питания $u_1 = U_m \sin(\omega t + j)$ и активных нагрузках.

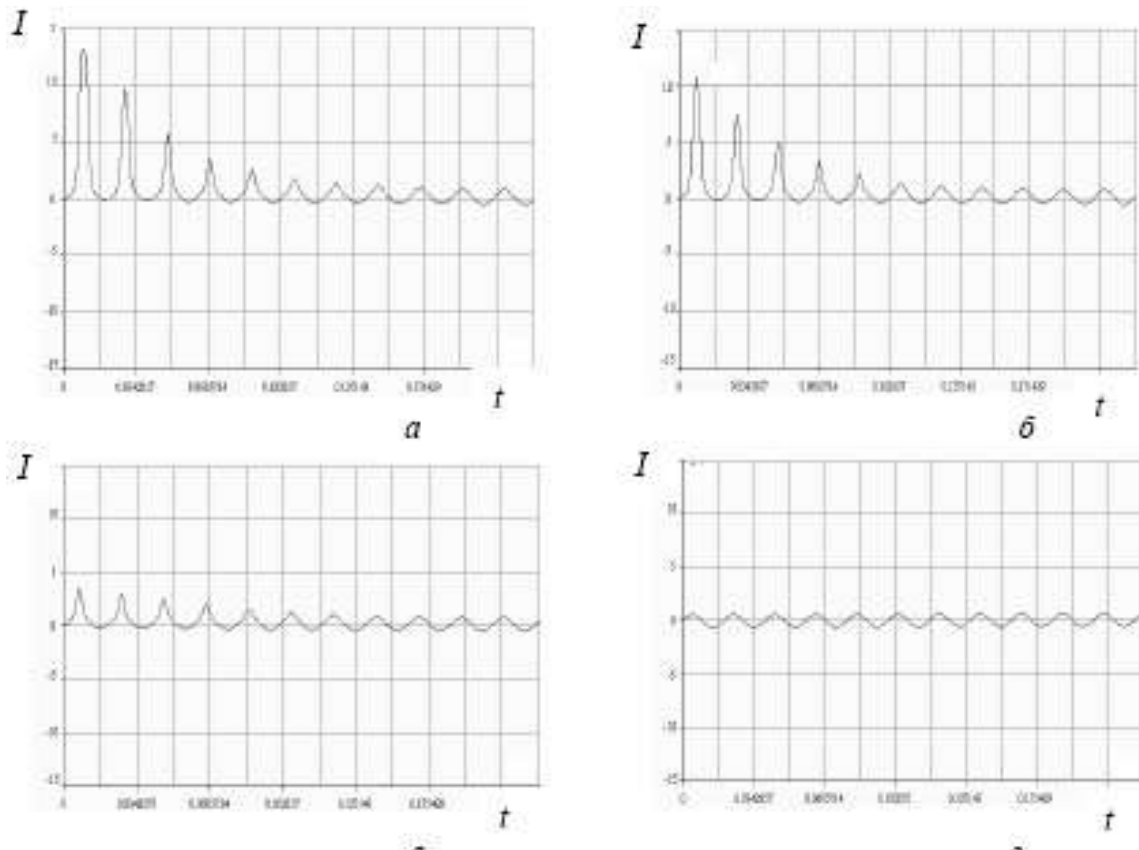


Рис. 1.2. Ток включения трансформатора при холостом ходе и фазах напряжения: а – $\varphi = 0^\circ$; б – $\varphi = 20^\circ$; в – $\varphi = 45^\circ$; г – $\varphi = 90^\circ$

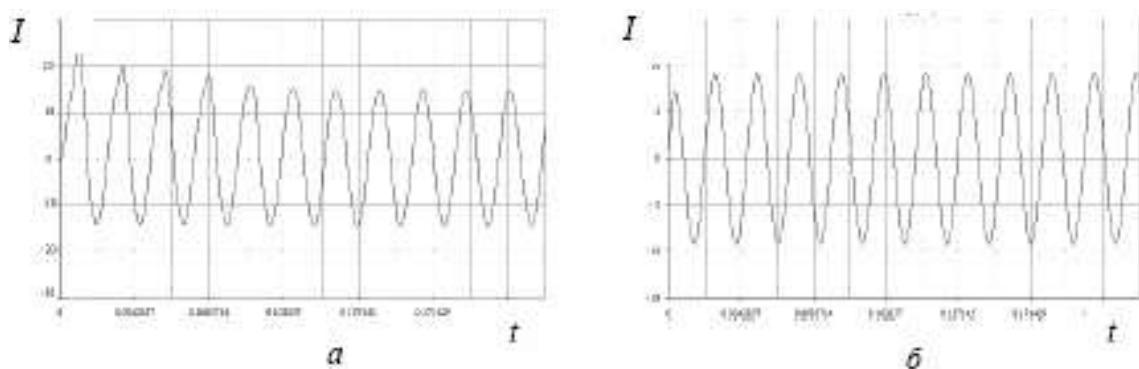


Рис. 1.3. Ток включения трансформатора при максимальной активной нагрузке и фазах напряжения: а – $\varphi = 0^\circ$; б – $\varphi = 90^\circ$

Из результатов моделирования следует, что самым неблагоприятным моментом включения трансформатора в сеть является переход первичного напряжения через нуль. В этом случае ударный ток трансформатора превышает ток холостого хода в 10 раз. При включении трансформатора в момент времени, соответствующий значению фазы $\varphi = 90^\circ$, ток первичной обмотки сразу становится равным рабочему. Это объясняется тем, что свободная составляющая магнитного потока в сердечнике при изменении первичного напряжения в момент включения не имеет возможности интенсивного роста, в отличие от случая при $\varphi = 0$. Включение трансформатора под нагрузкой и при $\varphi = 90^\circ$ в некоторой степени даже снижает ударный ток, так как нагрузка частично выводит рабочую точку на кривой намагничивания на линейный участок (за счет падения напряжения в активных сопротивлениях обмоток трансформатора). При прочих равных условиях величина ударного тока зависит от вида кривой намагничивания, величины рабочей индукции, остаточного потока сердечника.

Для проектирования СБЭП представляет интерес также процесс переключения трансформатора с одной сети на другую при перерывах, не превышающих времени затухания магнитного поля в сердечнике, однако принципиально характер переходных процессов изменения тока первичной обмотки при различных перерывах питания аналогичен рассмотренным выше. В данном случае все определяется результирующей постоянной времени, характеризующейся параметрами обмоток трансформатора и нагрузки и влияющей на скорость изменения потокосцепления. При трансформаторно-выпрямительном характере потребителя на динамические процессы включения дополнительное влияние оказывает нагрузка выпрямителя. Как правило, в устройствах автоматики и вычислительной техники на выходе выпрямителей присутствует RC -фильтр. Принципиально дело обстоит так, что в момент включения трансформаторно-выпрямительной нагрузки тенденция развития ударных токов, обусловленная нелинейной зависимостью кривой намагничивания материала сердечника, сохраняется. При этом дополнительный ударный ток создается за счет заряда конденсатора фильтра и длительность его определяется постоянной времени цепи заряда конденсатора. При включении трансформатора в сеть при переходе напряжения через нуль сначала синхронно с ростом первичного и вторичного напряжений появляется ток первичной обмотки, обусловленный зарядом конденсатора, а затем в области $\varphi = 0$ нарастает ток, обусловленный свободной составляющей магнитного потока (рис. 1.4, а).

При включении трансформатора в момент времени, соответствующий $\varphi = 90^\circ$, переходный ток определяется только зарядом конденсатора фильтра (рис. 1.4, б). В обоих случаях установившийся ток первичной обмотки не синусоidalен и состоит из синусоидального участка, определяемого током намагничивания, и «пикообразного» тока, необходимого для питания нагрузки при низком напряжении на конденсаторе фильтра.

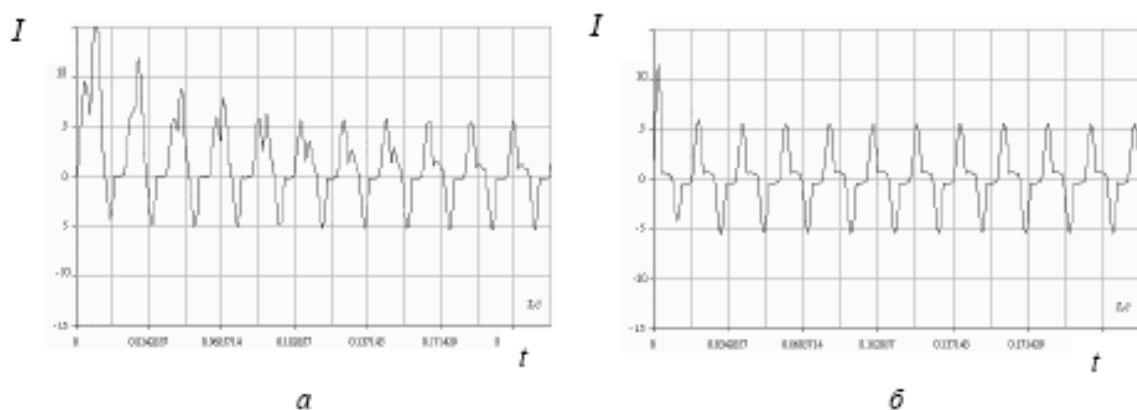


Рис. 1.4. Ток включения трансформатора под нагрузкой при работе на мостовой выпрямитель с конденсатором и различных фазах напряжения: а — $\varphi = 0^\circ$; б — $\varphi = 90^\circ$

В случае трансформатора с однополупериодным выпрямителем по его вторичной обмотке протекает прерывистый ток с постоянной составляющей (рис. 1.5, а, б).

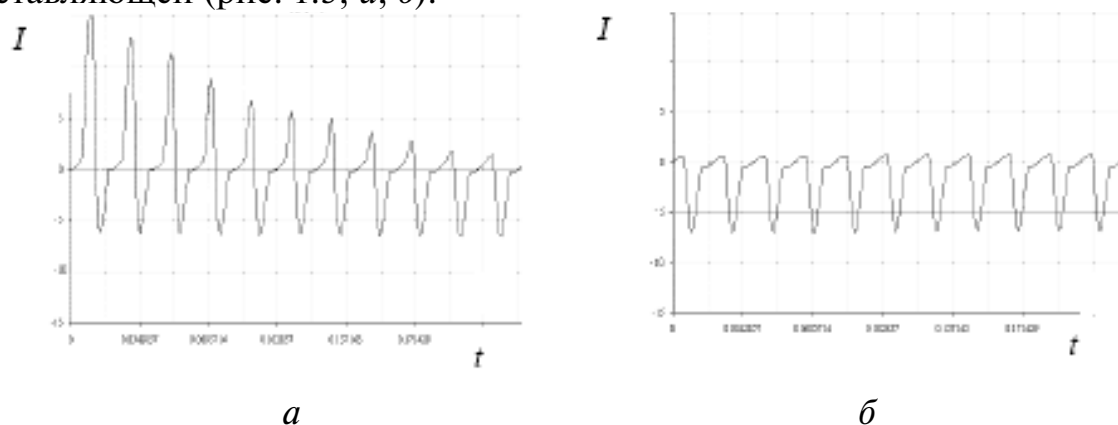


Рис. 1.5. Ток включения трансформатора под нагрузкой при работе на однополупериодный выпрямитель с конденсатором и различных фазах напряжения: а — $\varphi = 0^\circ$; б — $\varphi = 90^\circ$

Даже при включении трансформатора в сеть в момент времени, соответствующий $\varphi = 90^\circ$, когда потокосцепление начинает изменяться симметрично относительно временной оси, постоянная составляющая тока вторичной обмотки ввиду равенства намагничивающих сил

первичной и вторичной обмоток смещает потокосцепление по кривой намагничивания, вызывая появление постоянной составляющей намагничивающего тока. При этом следует отметить, что ток, потребляемый первичной обмоткой, постоянной составляющей не имеет. Как известно, ввиду этого растет габаритная мощность трансформатора. Однако если этот факт всегда учитывается при проектировании трансформатора конкретного вторичного источника электропитания, то при расчете выходного трансформатора СБЭП, как правило, «остается за кадром». Вместе с тем работа выходного трансформатора СБЭП на подобную нагрузку, в принципе, может выявить дефицит его габаритной мощности. Для сравнения на рис. 1.6 приведена осциллограмма тока потребления аппарата ИВЛ типа «Фаза-5» в режиме вентиляции легких с увлажнением.

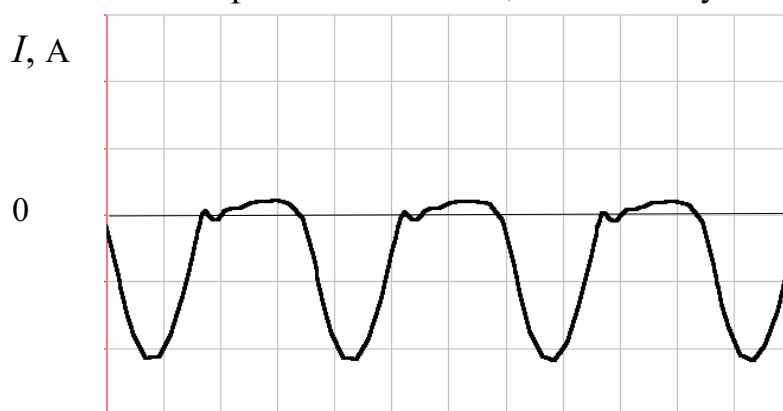


Рис. 1.6. Осциллограмма тока потребления ИВЛ «Фаза-5» в режиме вентиляции легких с увлажнением ($m_I = 2,5 \text{ А/дел}$)

Учитывая, что в трансформаторе всегда соблюдается условие $u_1 = k u_2$, где k — коэффициент трансформации, ток выпрямителя с RC-нагрузкой однозначно определяется напряжением вторичной обмотки. Этот факт позволяет рассмотреть ток первичной обмотки трансформатора как сумму тока, обусловленную лишь самим трансформатором на холостом ходу, как это было сделано выше, и тока, обусловленного нагрузкой выпрямителя, тем более что в ряде современных устройств очень часто используется бестрансформаторный мостовой выпрямитель, нагруженный на конденсатор фильтра и вторичный источник электропитания. В этом случае, из классической задачи включения RC-цепи на гармоническое напряжение $U = U_m \cos(\omega t + \varphi)$, ток в ней представляется следующим выражением:

$$i(t) = C \frac{dU_C}{dt} = -I_m \left[\sin(\omega t + \phi - \alpha - \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{\omega RC} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{t}{RC}} \right]. \quad (1.5)$$

Из выражения (1.5) следует, что если включение цепи происходит в момент, когда принужденный ток должен достигать максимума (при $\alpha = \varphi$), а принужденное напряжение на емкости должно быть равно нулю, то свободная составляющая напряжения на емкости не возникает и в цепи сразу без переходного процесса наступает установившийся режим. Ток потребления бестрансформаторных выпрямителей представлен на рис. 1.7, а, б.

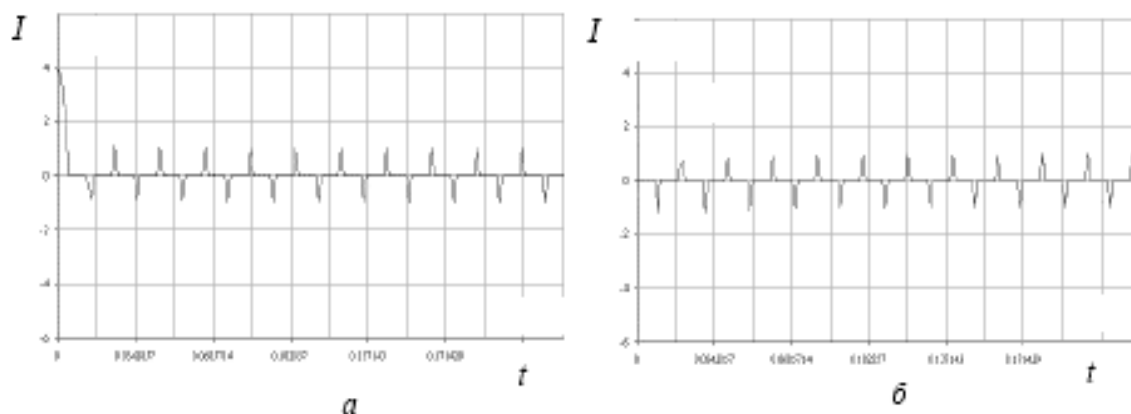


Рис. 1.7. Ток потребления однополупериодного бестрансформаторного выпрямителя с конденсатором под нагрузкой в момент включения при различных фазах напряжения: а — $\varphi = 0^\circ$; б — $\varphi = 90^\circ$

Рассмотрим динамические режимы нагрузки электромеханического типа: однофазный асинхронный конденсаторный двигатель (АКД) — на примере приводного двигателя, используемого в аппаратах ИВЛ типа «РО-6», «РО-9»; трехфазный АД — на примере приводного двигателя компрессора водоподготовки аппаратуры «искусственная почка»; коллекторный двигатель (КД) — на примере хирургических электроинструментов.

Математическое описание режимов работы двигателей произведем при следующих допущениях:

- отсутствуют вихревые токи, гистерезис, насыщение магнитной цепи;
- воздушный зазор равномерен;
- отсутствуют высшие пространственные гармоники поля (распределение полей обмоток синусоидально).

В неподвижной относительно статора системе координат α – β [9, 10] дифференциальные уравнения АКД относительно потокосцеплений обмоток статора и ротора в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_\alpha^S}{dt} \\ \frac{d\psi_\beta^S}{dt} \\ \frac{d\psi_\alpha^r}{dt} \\ \frac{d\psi_\beta^r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_\alpha^S \\ U_\beta^S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_\alpha^S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_\beta^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_\alpha^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_\beta^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^S \\ i_\beta^S \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\omega_r \psi_\beta^r \\ \omega_r \psi_\alpha^r \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

где ω_r — угловая скорость вращения ротора; $U_\beta^S = U_\alpha^S - U_C$; напряжение

на конденсаторе $U_C = \frac{i_\alpha^S}{\omega_s C}$ при емкости конденсатора C и круговой

частоте сети ω_s ; индуктивности и взаимоиндуктивности определяются аналогично трансформатору, а токи статора (индекс S) и ротора (индекс r) определяются выражениями:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^S \\ i_\beta^S \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma\alpha}^S & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m + L_{\sigma\beta}^S & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m + L_{\sigma\alpha}^r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m + L_{\sigma\beta}^r \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \psi_\alpha^S \\ \psi_\beta^S \\ \psi_\alpha^r \\ \psi_\beta^r \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

Поскольку на ток АКД в динамических режимах влияет момент нагрузки на валу, дополнительно следует рассмотреть и уравнение моментов:

$$M_{\text{АКД}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}} = M_{\text{ст}} + \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = L_m (i_\beta^S i_\alpha^r - i_\alpha^S i_\beta^r), \quad (1.8)$$

где J — приведенный к валу момент инерции вращающихся частей; $M_{\text{ст}}$, $M_{\text{дин}}$ — соответственно статический и динамический моменты нагрузки на валу АКД; p — число пар полюсов.

На рис. 1.8, а, б представлены результаты расчета включения в сеть и коммутации «с сети на сеть» при перерыве питания $\Delta t = 50$ мс (т. е. включение на незатухшее поле) однофазного АКД типа дАЗ.125.501 аппарата ИВЛ «РО-9Н». Двигатель имеет следующие данные: напряжение сети $U_c = 220$ В, 50 Гц, 1 ф; приведенный момент инерции $J = 0,03$ Нмс²; момент нагрузки на валу $M_n = 0,5$ Нм; параметры схемы замещения в общепринятых обозначениях: $r_1 = 18$ Ом; $x_1 = 15$ Ом; $r_2 = 18$ Ом; $x_2 = 20$ Ом; $x_m = 192$ Ом; $C = 8$ мкФ.

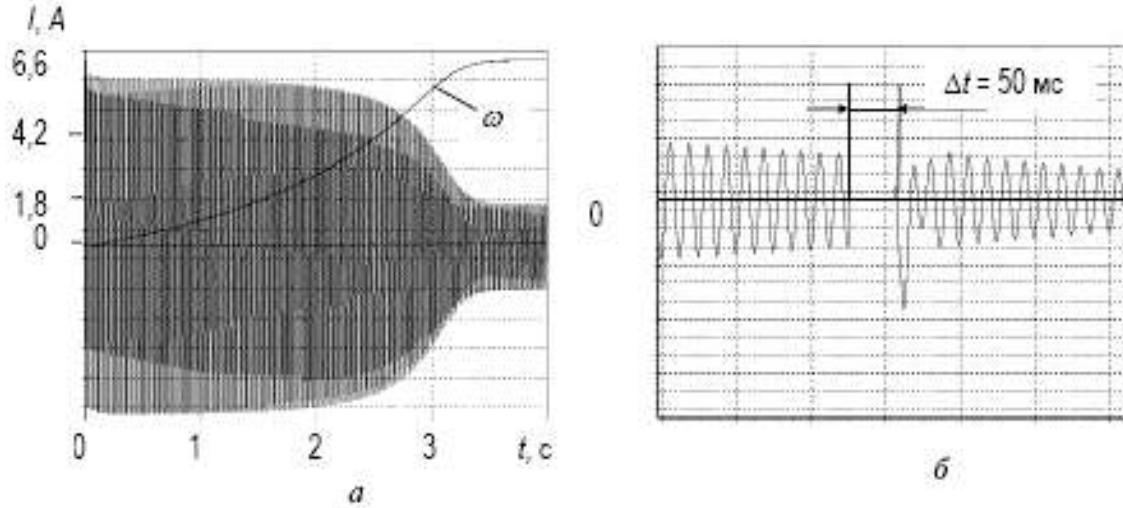


Рис. 1.8. Включение однофазного АКД аппарата ИВЛ «РО-6» в сеть (а),
 $\omega_{уст} = 2800$ об/мин; коммутация при незатухшем поле (б)

В отличие от однофазного АКД, для которого с физической точки зрения координаты $\alpha-\beta$ являются естественными, описание электромагнитных процессов в трехфазном АД лучше проводить в естественной системе координат, связанной с фазными осями статора A, B, C . При этом процессы в роторе представляются в системе координат $\alpha-\beta$, что допустимо для АД с короткозамкнутым ротором, поскольку нет необходимости иметь информацию о реальных токах ротора [10]. Сформированная таким образом комбинированная система записи матричных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} dI / dt = (-R / L)I + U \\ \psi' = LI \\ M_{АД} = (\sqrt{3} / 2)[\Psi_A^s(I_B^s - I_C^s) - I_A^s(\Psi_B^s - \Psi_C^s)] \end{cases}, \quad (1.9)$$

где

$$I = \begin{bmatrix} I_A^s & I_B^s & I_C^s & I_\alpha^r & I_\beta^r \end{bmatrix}^T; \quad U = \begin{bmatrix} U_A & U_B & U_C & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$\psi' = \begin{bmatrix} \Psi_A & \Psi_B & \Psi_C & \Psi_\alpha^r & \Psi_\beta^r \end{bmatrix}^T,$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & -0,5L_m & -0,5L_m & 1,5L_m & 0 \\ -0,5L_m & L_1 & -0,5L_m & -0,75L_m & 0,75\sqrt{3}L_m \\ -0,5L_m & -0,5L_m & L_1 & -0,75L_m & -0,75\sqrt{3}L_m \\ 1,5L_m & -0,75L_m & -0,75L_m & 1,5L_2' & 0 \\ 0 & 0,75\sqrt{3}L_m & -0,75\sqrt{3}L_m & 0 & 1,5L_2' \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,75\sqrt{3}\omega_r L_m & 0,75\sqrt{3}\omega_r L_m & 1,5R_2 & -1,5L'_2\omega_r \\ 1,5\omega_r L_m & -0,75\omega_r L_m & 0,75\omega_r L_m & -1,5L'_2\omega_r & 1,5R_2 \end{bmatrix}.$$

На рис. 1.9, а, б представлены аналогичные предыдущему случаю результаты для трехфазного АД привода компрессора системы водоподготовки аппарата «искусственная почка». Двигатель имеет следующие данные: тип 4А90L2У3, номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 3,0$ кВт, напряжение сети $U_{\text{сф}} = 220$ В, 50 Гц, 3 ф; приведенный момент инерции $J = 0,01$ Нмс²; номинальный момент нагрузки на валу $M_{\text{н}} = 10$ Нм; параметры схемы замещения в общепринятых обозначениях: $r_1 = 2,56$ Ом; $x_1 = 2,0$ Ом; $r_2 = 1,7$ Ом; $x_2 = 3,6$ Ом; $x_m = 122,4$ Ом.

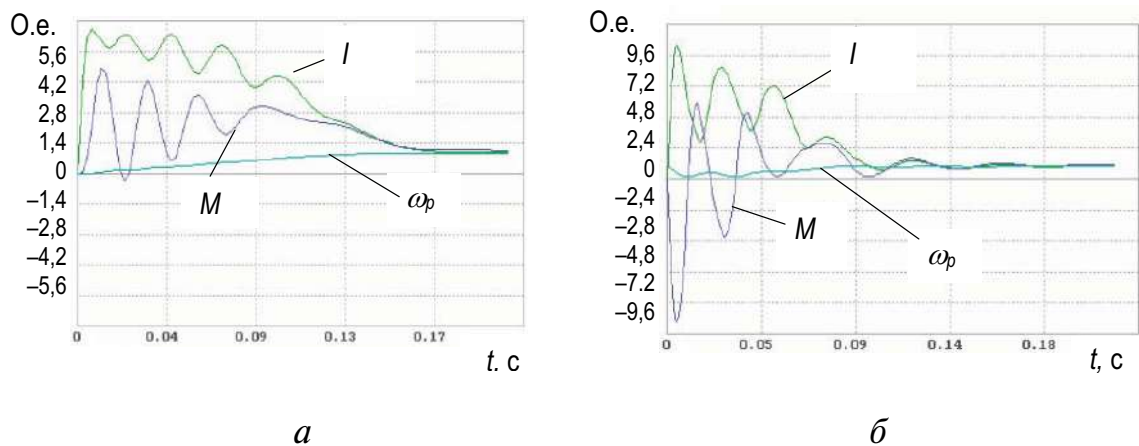


Рис. 1.9. Включение трехфазного приводного АД компрессора системы водоподготовки аппарата «искусственная почка» в сеть (а) и повторное включение на незатухшее поле, $\tau = 5$ мс (б)

Как показывают расчетные и экспериментальные данные, кратность ударных токов статора указанных двигателей при включении и коммутации на незатухшее поле может достигать значений порядка 5–7.

При исследовании режимов пуска и коммутации вышеуказанных типов электродвигателей переменного тока было проведено сравнение результатов моделирования, полученных с помощью линейной модели (1.6–1.8) и модели, учитывающей нелинейность магнитной цепи по основному потоку. При этом отличие максимальных фазных токов при варьировании фазой включения напряжений составило значение не

более 3–5 %. Такая малая зависимость результатов моделирования от нелинейности характеристики реальной электротехнической стали (в отличие от трансформатора) физически объясняется наличием воздушного зазора и взаимодействием фаз. Наибольшее влияние на кратность тока и момента оказывает насыщение зубцовой зоны.

Дополнительно отметим, что приводные АКД некоторых типов компрессоров, в частности в современных интеллектуальных аппаратах ИВЛ типа «Drager», работают при практически не затухающих по амплитуде и фазе колебаниях несинусоидального тока потребления (см. осциллограмма, рис. 1.10).

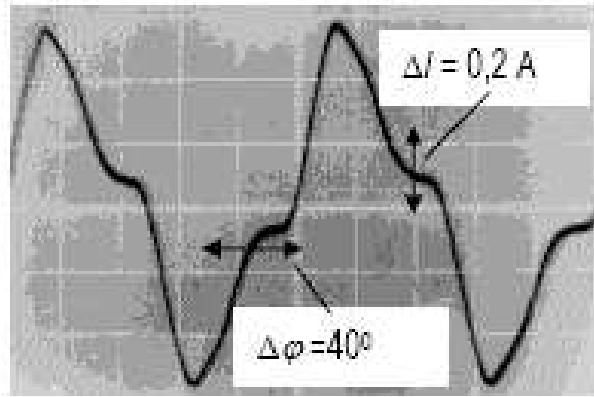


Рис. 1.10. Ток однофазного АКД аппарата ИВЛ «Drager» ($m_l = 0,7 \text{ А/дел}$)

Для исследования однофазного коллекторного двигателя переменного тока будем считать, что щетки расположены на нейтрали и существует лишь поперечная реакция якоря, которая, в предположении линейных электромагнитных связей, не оказывает влияния на поле обмотки возбуждения.

Дифференциальное уравнение КД в матричной форме, разрешенное относительно тока, можно представить в следующей матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{\beta}^s}{dt} \\ \frac{di_{\alpha}^r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma\alpha}^s & 0 \\ 0 & L_m + L_{\sigma\beta}^r \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} U_{\beta}^s \\ U_{\alpha}^r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{\beta}^s & 0 \\ 0 & r_{\alpha}^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\beta}^s \\ i_{\alpha}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_r L_m i_{\beta}^s \end{bmatrix} \right\}. \quad (1.10)$$

На рис. 1.11 а, б представлен ток включения в промышленную сеть КД хирургической электродрели, используемой в костной травматологии, при различных фазах напряжения (приведенный момент инерции $J = 0,002 \text{ Нм} \cdot \text{с}^2$; момент нагрузки $M_n = 1,5 \text{ Нм}$).

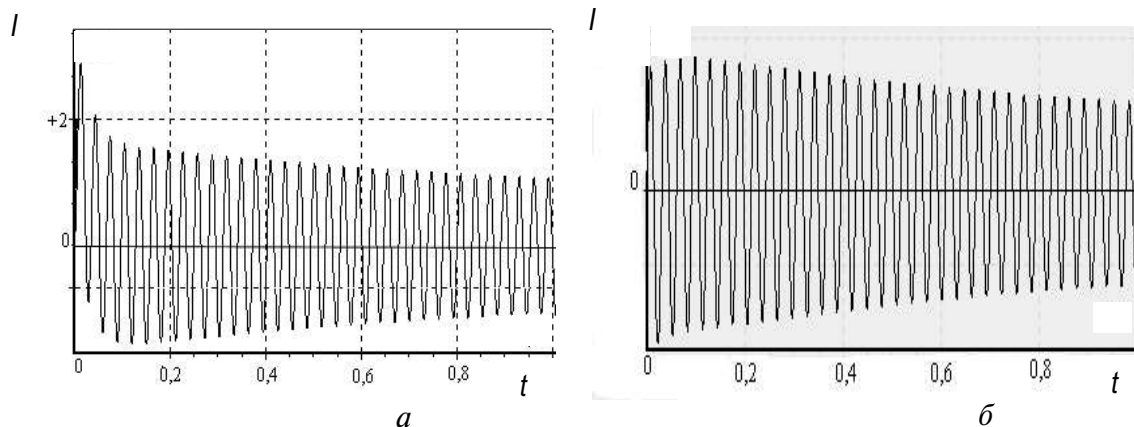


Рис. 1.11. Ток включения однофазного КД привода хирургической дрели при фазах напряжения: а – $\varphi = 0^\circ$; б – $\varphi = 90^\circ$

Как показывают расчет, практика и литературные данные, в частности [10], в зависимости от параметров двигателя и нагрузки характер переходного процесса тока может носить апериодический или колебательный характер. Кратность пускового тока маломощных однофазных КД, применяемых в ответственных ТП, как правило, не превышает значения 3...5.

1.1.2. Наземная аппаратура, ответственная за движение транспорта

Среди большого разнообразия аппаратуры, обеспечивающей безопасность перемещения транспортных средств, особо выделяется установленная в комплексах за слежением быстро движущихся объектов — скоростных поездов и летательных аппаратов. Ответственная аппаратура железнодорожных диспетчерских пунктов в аварийных режимах, как правило, работает на постоянном токе (если речь не идет о компьютерах, получающих питание от промышленной сети). К аппаратуре же контрольных диспетчерских пунктов (КДП) аэропортов предъявляются требования, обязывающие иметь резервное электропитание переменного тока промышленной частоты.

Анализ состояния безопасности полетов в службе эксплуатации радиотехнического оборудования и связи гражданской авиации за период 1985—2000 гг. показал, что около 50 % предпосылок к авиационным происшествиям связано с нарушением электроснабжения объектов радиотехнического обеспечения полетов и управления воздушным движением [11].

В КДП аэропортов особо выделяется аппаратура наземного оборудования системы посадки, включающая в себя курсовой, глиссадный и

маркерный радиомаяки. При этом курсовой и глиссадный радиомаяки относятся к категории электроприемников особой группы с допустимым временем перерыва в электроснабжении, равным нулю. Ближний маркерный радиомаяк отнесен к первой категории электроприемников с перерывом электроснабжения в аварийных режимах не более 1 с.

К особой группе отнесено также связанное и компьютерное оборудование службы связи: центры федерального и регионального уровня сети; оконечный центр сети.

В качестве примера рассмотрим наземное оборудование системы посадки СП-80 ТЖ1.400.105, предназначенное для обеспечения информации о местонахождении самолета относительно взлетно-посадочной полосы во время захода на посадку в условиях метеоминимума 2-й и 3-й категорий ИКАО в аэропортах с благоприятными условиями местности.

В систему посадки входят:

1) курсовой радиомаяк (КРМ) ТЖ1.400.106. Питание КРМ осуществляется от трехфазной сети $380\text{ В} \pm 10\%$, 50 Гц. Потребляемая мощность — 6 кВт (основная радиоаппаратура — 1 кВт);

2) глиссадный радиомаяк (ГРМ) ТЖ1.400.107. Питание ГРМ осуществляется от трехфазной сети $380\text{ В} \pm 10\%$, 50 Гц. Потребляемая мощность — 6 кВт (основная радиоаппаратура — 1 кВт);

3) два маркерных радиомаяка (МРМ) ТЖ1.400.093-01. Питание МРМ осуществляется от однофазной сети $220\text{ В} +10...15\%$, 50 Гц. Потребляемая мощность не более 1 кВт;

4) шкаф дистанционного управления ТЖ2.157.036. Питание шкафа осуществляется от однофазной сети $220\text{ В} +10...15\%$, 50 Гц. Потребляемая мощность — около 500 Вт;

5) панель отображения информации ТЖ2.390.335;

6) компьютеры и мониторы (20') для обработки и отображения информации о ситуации в воздушном пространстве в зоне аэропорта. Общая потребляемая мощность — около 2,5 кВА.

Входные цепи вышеуказанных потребителей представляют собой рассмотренные ранее трансформаторно-выпрямительные блоки, нагруженные на емкостные фильтры (дополнительно в наиболее ответственных цепях постоянного тока основной радиоаппаратуры КРМ и ГРМ предусмотрены никель-кадмиевые аккумуляторы), а также бестрансформаторные выпрямители с емкостным накопителем.

1.1.3. Аппаратура ответственной корабельной автоматики

Обеспечение бесперебойного электропитания ответственных систем корабельной автоматики является непременным условием надежного функционирования и безопасности эксплуатации современного корабля. К таким системам относятся прежде всего системы управления и защиты аппаратуры паропроизводительных установок кораблей с ядерными реакторами на борту, и в частности на атомных ледоколах [12]. Нарушение или кратковременный сбой электропитания может произойти в случаях:

- 1) гипотетического тотального выхода из строя двух генераторных систем электроснабжения («правого» и «левого» бортов);
- 2) при переходе электроснабжения потребителей от основной сети (правый борт) на резервную (левый борт);
- 3) при переходе с бортовой сети на аварийную дизель-генераторную;
- 4) при переходе с бортовой сети на береговую.

При этом нарушения могут возникать ввиду инерционности контактных систем автоматики и в условиях несинхронности основной или резервной сетей. Нарушения (даже кратковременные) электроснабжения, как правило, приводят к срабатыванию аварийной защиты ядерного реактора, что является весьма нежелательным явлением при его эксплуатации. Кроме того, в условиях следования ледокола в караване судов несанкционированное выключение ядерной силовой установки может привести к серьезным авариям.

Как пример, одна из систем управления и защиты, под названием «Марс», предназначена для управления и защиты аппаратуры паропроизводительных установок КЛТ40, КЛТ40М и их модификаций и удовлетворяет требованиям «Правил классификации и постройки атомных судов» регистра для судов неограниченного района плавания и требованиям ПБЯ-08-081. Система включает в себя комплекс датчиков и схем слежения за состоянием ядерного реактора (датчики температуры на входе и выходе в аппарат; датчики нейтронной мощности; датчики реперных точек; положения; сигнализатор кратных положений групп стержней; сигнализатор течи; схема управления питательным клапаном; аппаратура питания полуобмоток электромагнитов аварийной защиты и т. д.).

Электропитание системы «Марс» осуществляется от одной из бортовых сетей 220 В, 400 Гц, организованных трехфазными электрическими генераторами. При этом полная мощность системы не превышает 1,5 кВА. Входные цепи системы представляют собой рассмотренные ранее трансформаторно-выпрямительные блоки, нагружен-

ные на емкостные фильтры или электромагниты.

СБЭП на основе полупроводниковых преобразователей напряжения позволяют решить задачу безобрывного синхронизированного перехода с основной сети на резервную и наоборот. При этом СБЭП постоянно осуществляет слежение сразу за основной и резервной сетями двух бортов. В случае чрезмерного отклонения или исчезновения напряжения в основной сети СБЭП безобрывно переводит на себя питание потребителей, синхронизируется с резервной сетью и передает ей потребителей. Обратный переход происходит аналогично. Таким образом, СБЭП, находясь постоянно в дежурном режиме, выполняет не только роль автономного источника аварийного электроснабжения, но и является своеобразным инструментом для синхронного и безобрывного перевода ответственных потребителей устройств корабельной автоматики с основной сети на резервную и наоборот.

1.1.4. Аппаратура и ответственные электромеханические устройства взрыво- и пожароопасных производств

Среди производств с ответственными ТП особо выделяются такие, где при нарушении технологического цикла могут возникнуть взрыво- и пожароопасные ситуации. На подобных производствах (химической, газовой, пищевой и др. промышленности) в случае предаварийных ситуаций при пропадании напряжения промышленной сети необходимо быстро перекрыть трубопроводы, поддержать питание контакторов, реле, электромагнитов и т. п. [13]. Потребители на таких производствах (в частности АД), как правило, получают питание от промышленной трехфазной сети, и, следовательно, СБЭП должна быть трехфазной.

В отличие от широко распространенных однофазных СБЭП, трехфазные, при общих с однофазными структурными принципами построения, имеют свои особенности. Эти особенности связаны прежде всего со спецификой нагрузки: «группа асинхронных двигателей — приводимые в движение механизмы». С учетом «электромеханического» аспекта нагрузки основными особенностями в данном случае являются:

- 1) высокая перегрузочная способность в течение переходного процесса ввиду 5...7-кратных бросков тока АД при включениях;
- 2) обеспечение приемлемого электромагнитного переходного процесса при переключениях в системе «СБЭП — группа АД» с целью минимизации ударных моментов в приводимых в движение механизмах.

Особенности электромагнитных процессов при коммутации нагрузок электромеханического типа были рассмотрены ранее.

1.1.5. Современные коммуникационные системы

Внедрение новейших информационных технологий и систем на большинстве современных предприятий привело к появлению «высокоинтеллектуального» дорогостоящего компьютерного, сетевого и телекоммуникационного оборудования с особыми требованиями к качеству питающего напряжения. В настоящее время многочисленные системы связи представляют собой органическое сочетание приемопередающих устройств различного типа с компьютерным оборудованием: телефонные и телеграфные станции; телевизионные передающие центры; вычислительные центры, непосредственно управляющие ответственными ТП, и т. д. По характеру входных цепей эти нагрузки, как правило, представляют собой трансформаторно-выпрямительные блоки, бестрансформаторные выпрямители и однофазные АД, используемые в качестве вентиляторов.

Как было отмечено ранее, некачественное электропитание телекоммуникационной и вычислительной аппаратуры способно при возникновении серьезных аварий привести и к большим экономическим убыткам. Например, исследования компании IBM, проведенные на территории США, показали, что средний компьютер в месяц испытывает 120 проблем, связанных с электропитанием. Из всех происшествий в электросети, по данным лабораторий корпорации Белл, 87 % составляют кратковременные понижения напряжения и 4,7 % — полное исчезновение напряжения. Для сравнения: неисправность оборудования или программного обеспечения — 8,2 %, ошибка оператора ЭВМ или саботаж — 3,2 %. По результатам исследований «Yankee Group» более половины компаний теряют за час простоя около 1000 долл., а 9 % за тот же час теряют более 50 000 долл. Качество электропитания на территории России ненамного лучше.

Потеря компьютером электропитания в момент выполнения операции записи на диск приведет, как минимум, к невозстановимой потере записываемого файла и, как максимум, к краху диска в результате нарушения достоверности *FAT1*. Аппаратно диск останется невредим, но станет нечитаемым и его придется переформатировать. Это означает, что все программное обеспечение и данные, находившиеся на этом диске, будут безвозвратно утрачены. Эта угроза становится особенно

острой по отношению к файл-серверам, которые практически непрерывно выполняют операции чтения-записи на диск.

Некоторые персональные операционные системы (например, *Windows 95*) и большинство сетевых для ускорения дисковых операций содержат образ *FAT* в оперативной памяти и обновляют его на диске периодически, но не при каждой операции записи. Потеря питания для таких систем с гораздо большей вероятностью приведет к тяжелым последствиям, вплоть до необходимости переформатировать винчестер.

Еще одну угрозу для данных представляет кеш-память, как промежуточный пункт хранения данных, в котором они наиболее уязвимы. Все современные операционные системы, особенно многозадачные, даже *Windows 3.1*, используют кеширование диска. Кеш — это участок оперативной памяти, в котором для ускорения дисковых операций содержится отображение наиболее активно используемой зоны диска. Поэтому файл, отправленный на запись, не сразу попадает на диск. Этот файл будет храниться в кеш, пока его содержимое не будет отправлено на диск. Это происходит по мере заполнения кеша либо при выходе из операционной системы. Если содержимое кеша не будет отправлено на диск, при выключении питания содержимое оперативной памяти потеряется, в том числе и «записанный» файл, находившийся в кеше. Вот почему во всех руководствах к операционным системам, как сетевым (*NetWare*, *Windows NT*, *OS/2*), так и персональным (*Windows 3.1*, *Windows 95*), присутствует предупреждение о том, что потеря питания компьютером до выполнения процедуры выхода из операционной системы может привести к потере данных. Некачественное электропитание может привести не только к потере данных. Пожалуй, гораздо опаснее искажение данных, потому что оно может проявиться не сразу, а последствия искажения информации могут быть непредсказуемы.

Емкость АБ СБЭП как резервного источника ограничена, и если электроснабжение отсутствует дольше, чем может обеспечить АБ, компьютер точно так же потеряет питание. Время работы СБЭП от АБ дается не только на аварийное электроснабжение, но и на завершение работы, включающей выход (в «ручном» или автоматическом режиме) из операционной системы и сохранение всех данных. Основная функция такой поддержки СБЭП возложена на специальное программное обеспечение, которое также должно осуществлять диагностику и тестирование СБЭП, включая АБ.

1.1.6. Электроприемники промышленных объектов газовой промышленности

Объектами систем электроснабжения в газовой промышленности являются: объекты добычи, переработки, транспорта газа и нефтепродуктов, буровые установки, подземные хранилища газа, газораспределительные станции (ГКС), автоматические газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС), системы КИПиА, электрохимзащиты (ЭХЗ) и связи, котельные установки и вспомогательные объекты, обеспечивающие жизнедеятельность технологических и коммунально-бытовых потребителей [РД 51-00158623-06-95].

Для объектов этого класса существует дифференцированная отраслевая классификация электроприемников относительно обеспечения надежности электроснабжения. В соответствии с ПУЭ к особой и первой категории электроприемников, требующих бесперебойного электропитания на основе совокупности статических и электромеханических систем, относятся:

- системы КИПиА (предприятий по добыче газа, головных сооружений дожимных компрессорных станций), аварийное освещение, пожарные насосы;
- насосные станции по перекачке нефтепродуктов;
- промежуточные насосные станции с емкостью на границе эксплуатационных участков трубопроводов;
- компрессорные станции попутного газа на нефтяных месторождениях и магистральных газопроводах;
- станция подземного хранения газа;
- узлы связи;
- системы связи, аварийное освещение, пожарные насосы и электроприемники, необходимые для работы одного котла на котельной газоперерабатывающего завода.

Следует отметить, что особая группа электроприемников выделяется из состава первой и второй категорий, бесперебойная работа которых необходима для обеспечения нормальной работы технологического оборудования в течение ограниченного времени или безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы для жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования. Последствия перерывов электроснабжения электроприемников

промышленных объектов газовой промышленности могут привести к размораживанию водоводов и сетей, переполнению емкостей, прекращению транспорта газа, неработоспособности систем пожаротушения, аварийному повышению температуры на станции охлаждения газа и т. п.

1.2. Требования стандартов к качеству электропитания

В российских системах электроснабжения показатели качества электроэнергии в точках общего присоединения приемников, находящихся в собственности различных потребителей, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 13109-97 [14]. Стандарт устанавливает нормально допустимые и предельно допустимые нормы качества электроэнергии для кондуктивных помех и характеризует следующие виды его нарушения:

1. Отклонение напряжения δU_v . Характеризуется как разность номинального и установившегося (более 1 мин) действующего значений напряжения. Нормально и предельно допустимые значения δU_v составляют, соответственно, ± 5 и ± 10 % от номинального значения напряжения сети.

2. Колебания напряжения. Характеризуются размахом изменения напряжения δU_i и дозой фликкера P_f . Первая характеристика в качестве показателя использует разницу соседних уровней среднеквадратичных значений напряжения при прямоугольной форме огибающей и различной частоте повторения. График изменения напряжения δU_i в зависимости от частоты повторения изменения или интервала между изменениями приведен в изложении [14]. Там же приведены и методы оценки соответствия размаха изменений напряжения нормам стандарта при колебаниях напряжения с формой, отличающейся от меандра. Вторая характеристика — доза фликкера. Фликкер (англ. *flicker* — мерцание) — субъективная оценка, характеризующая восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников света, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети. Доза фликкера — мера восприятия человеком фликкера за установленный промежуток времени. Методы расчета дозы фликкера изложены в [14]. Предельно допустимое значение суммы установившегося отклонения напряжения δU_v и размаха изменений напряжения δU_i в точках присоединения к электрическим сетям напряжением 0,38 кВ равно ± 10 % от номинального напряжения [14].

3. Несинусоидальность напряжения.

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- коэффициентом n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента K_U в точках общего присоединения к электрическим цепям с напряжением 0,38 кВ составляют, соответственно, 8 % и 12 %. Значения коэффициента $K_{U(n)}$ приведены в [14] в табличной форме.

4. Несимметрия напряжений. Оценивается коэффициентами по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям с помощью метода симметричных составляющих или по формулам, приведенным в [14]. Эти коэффициенты равны, соответственно, отношению напряжений обратной и нулевой последовательностей к напряжению прямой последовательности, и для нормальных и предельных значений для напряжения 0,38 кВ составляют 2 % и 4 %.

5. Отклонение частоты. Оценивается как разность номинального и текущего значения частоты напряжения сети и составляет $\pm 0,2$ Гц и $\pm 0,4$ Гц для нормального и предельного режимов.

6. Провал напряжения. Характеризуется внезапным снижением напряжения на величину — более 10 % от номинального значения с последующим восстановлением через промежуток времени от 10 мс до 30 с в сетях до 20 кВ.

7. Импульс напряжения. Оценивается показателем импульсного напряжения $U_{\text{имп}}$. Фактически это амплитуда импульса, накладываемого на напряжение сети. ГОСТ 13109-97 не устанавливает нормы на импульсы напряжения, однако в приложении к стандарту приводятся статистические данные значений импульсных напряжений для грозовых и коммутационных импульсов для воздушных и кабельных линий. Отметим, что в воздушных и кабельных линиях сети 0,38 кВ импульс напряжения не превышает значений 10 и 6 кВ, соответственно. Коммутационное импульсное напряжение не превышает значения 4,5 кВ.

8. Временное перенапряжение. Характеризуется коэффициентом временного перенапряжения $K_{\text{пер } U}$, равным отношению максимальных амплитудных значений напряжений при перенапряжении и номинальном напряжении при продолжительности более 10 мс. В среднем за год в точке присоединения возможно около 30 временных перенапряжений при $K_{\text{пер } U}$ не более 1,47 при условии целостности проводников сети. Однако при обрыве нулевого провода в трехфазных электрических се-

тях напряжением до 1 кВ, работающих с глухозаземленной нейтралью, возникают временные перенапряжения между фазой и землей. Уровень таких перенапряжений при значительной несимметрии фазных нагрузок может достигать значений междуфазного напряжения, а длительность — нескольких часов. Кроме вероятного выхода из строя электрооборудования, обрыв нулевого провода представляет потенциальную пожарную опасность.

Любая СЭП в отсутствие сетевого напряжения и при наличии первичного источника напряжения фактически превращается в автономную. На автономные сети и СЭП ГОСТ 13109-97 не распространяется. Однако существует ряд стандартов на качество электроэнергии подобных систем. Стандартизованы требования к качеству электроэнергии:

- 1) в полупроводниковых преобразователях [15, 16];
- 2) в системах (агрегатах) бесперебойного электропитания [17, 18];
- 3) в системах электроснабжения подвижных объектов (самолетов [19], морских и речных судов [20], автомобилей [21, 22], электропоездов [23]);
- 4) СЭП устройств связи [24, 25].

Отметим, что стандарты [19–23, 25] являются отраслевыми. Полупроводниковые преобразователи являются основой любых современных полупроводниковых СЭП, в том числе и СБЭП, выделившихся в последние десятилетия в отдельный класс устройств силовой электроники со своей терминологией и классификацией, определенной в стандарте МЭК IEC 62040-3. Что касается всех полупроводниковых СП, в общих технических требованиях [15] и методах испытаний [16] для них содержатся дополнительные показатели качества электроэнергии, отсутствующие в стандарте на электрические сети общего пользования [14]. Это:

- *коэффициент амплитудной модуляции напряжения,*

$$k_{\text{мод}} = U_{\text{мод}} / U_{\text{ном}}, \quad (1.11)$$

где $U_{\text{мод}}$ — половинная разность между максимальным и минимальным значениями огибающей амплитуд напряжения; $U_{\text{ном}}$ — действующее значение номинального напряжения;

- *отношение выходного напряжения к частоте, U/f ;*
- *коэффициент пульсаций (для СП с постоянным выходным напряжением),*

$$k_{\text{пул}} = (U_{\text{пул}} / U_{\text{ном}}) 100 \%, \quad (1.12)$$

где $U_{\text{пул}}$ — амплитудное значение переменной составляющей выходного напряжения; $U_{\text{ном}}$ — номинальное значение выходного напряжения.

На СБЭП в настоящее время в России действует ГОСТ 27699-88 [16] (Стандарт СЭВ 5874-87) «Системы бесперебойного питания приемников переменного тока. Общие технические условия», регламентирующий лишь шесть общих показателей:

- 1) стабильность выходного напряжения не менее $\pm 5\%$;
- 2) стабильность частоты выходного напряжения не менее $\pm 2\%$;
- 3) гармонические искажения выходного напряжения не менее $\pm 5\%$;
- 4) нестабильность входного напряжения — $(-15...+10)\%$ от номинального значения;
- 5) нестабильность частоты входного напряжения не менее $\pm 2\%$;
- 6) перегрузочная способность в течение 900 с — 110 %.

СБЭП фактически является полупроводниковым преобразователем частоты, однако по последнему показателю наблюдается разночтение с ГОСТ 24607-88 [15], в котором перегрузочная способность в течение 900 с определена на уровне 125 %.

Преобразование и потребление электроэнергии неизбежно приводит к понятию «электромагнитная совместимость» технических систем. При своей работе система «СП-нагрузка» неизбежно «вступает во взаимоотношения» с питающей сетью и окружающей средой. В этом смысле способность нормального функционирования технического средства («СП-нагрузка») при наличии кондуктивных (из питающей сети, по проводам) и индуктивных (из окружающей среды) электромагнитных помех, при условии отсутствия недопустимых помех со своей стороны для питающей сети и окружающей среды, и есть электромагнитная совместимость (ЭМС).

Рассмотренные выше в рамках ГОСТ 13109-97 нормы качества электроэнергии являются составной частью проблемы ЭМС. В целом содержание проблемы ЭМС можно отобразить схемой (рис. 1.12), аналогичной представленной в [26]. Дополнительно следует отметить, что существуют также стандарты на помехоустойчивость, тесно взаимодействующие со стандартами, приведенными в колонках рис. 1.12, и имеющие отношение к электронным техническим системам:

- электрического привода с регулируемой скоростью вращения [27];
- оборудования информационных технологий [28];
- светового оборудования [29];
- электрооборудования для измерения, управления и лабораторного применения [30];
- технических средств, применяемых в промышленных зонах [31];

- технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением [32].

Предельно допустимые уровни воздействия на людей электромагнитных излучений определяются стандартами для промышленных предприятий [33, 34] и санитарными нормами и правилами [35].

Не комментируя обширное содержание стандартов (рис. 1.12), отметим, что фактически ЭМС есть «дисциплинированность» и «культура» потребления и преобразования электроэнергии в электронных системах, в том числе в полупроводниковых СЭП. Как справедливо отмечено в [36], такая дисциплинированность «...возникла впервые в тех отраслях промышленности, где правилом является системная интеграция». Интеграция же предполагает согласованную в рамках единого ТП совокупность электропотребителей различного принципа действия, а следовательно и различного способа потребления и преобразования энергии. Современная СЭП, как преобразователь и «поставщик» электроэнергии, при рациональном построении способна решить рассмотренные выше проблемы, используя способы формирования напряжения, частоты, фильтрации, построения систем резервирования, экранирования и заземления.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения ГОСТ 13109-97.
2. Что следует понимать под электромагнитной совместимостью?
3. Приведите примеры «ответственных» технологических процессов.

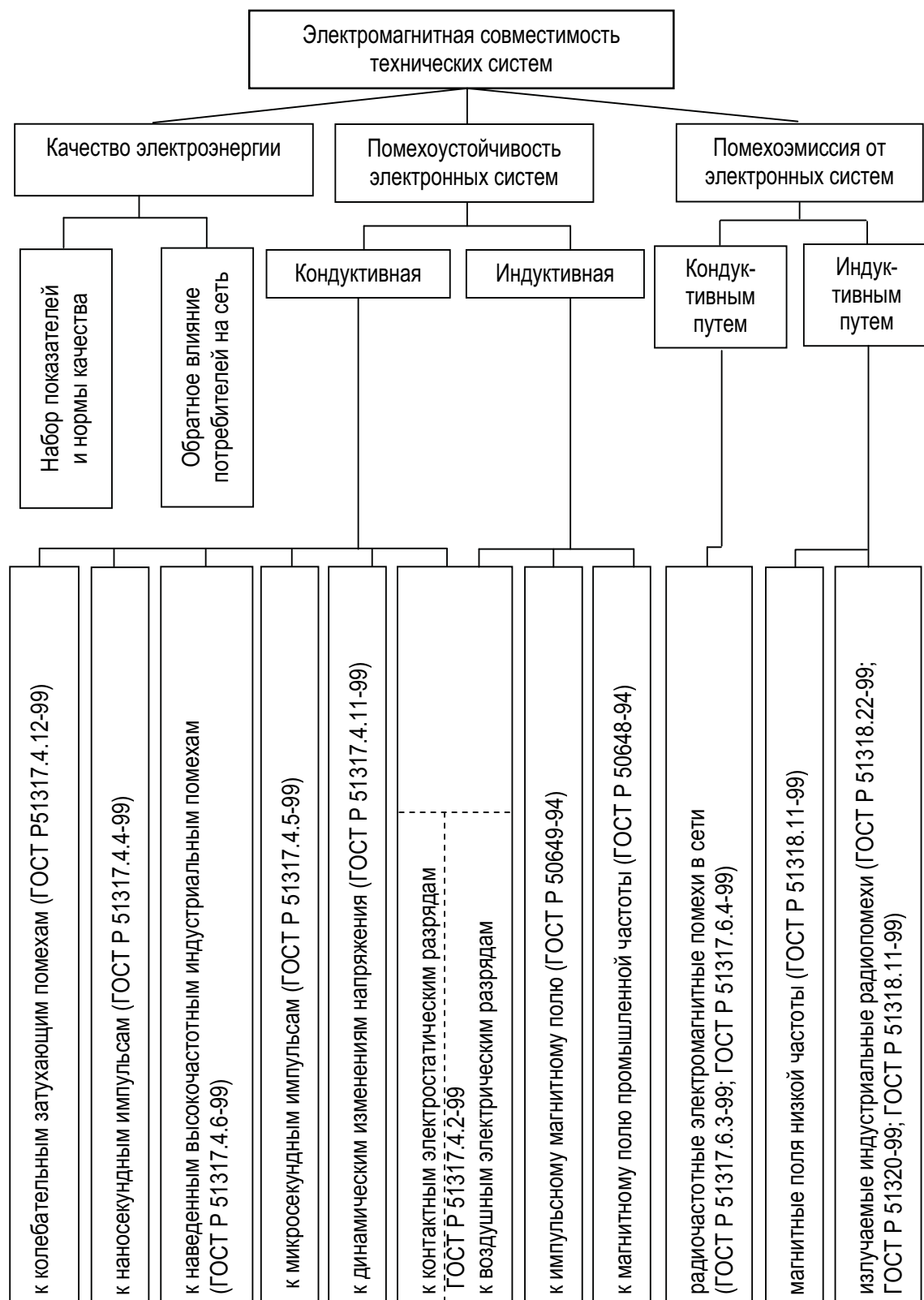


Рис. 1.12. Содержание электромагнитной совместимости технических систем

Глава 2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Статические СЭП ответственных потребителей постоянного и переменного тока – СБЭП – строятся, как правило, на основе АИН, АБ и выпрямителей (в общем случае это трансформаторно-выпрямительный блок – ТВБ). Следует отметить, что совокупность АИН и выпрямителей является основой конверторов (« $DC-DC$ »-преобразователи) – преобразователей постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня.

На рис. 2.1 представлен общий случай СЭП для совокупности потребителей постоянного и переменного тока. Не рассматривая в данной главе канал постоянного тока СЭП «выпрямитель – аккумуляторная батарея – конвертор», отметим, что канал переменного тока «выпрямитель – аккумуляторная батарея – инвертор» является схмотехнически более сложным, поскольку предусматривает взаимодействие отдельных каналов между собой и с сетью на переменном токе.

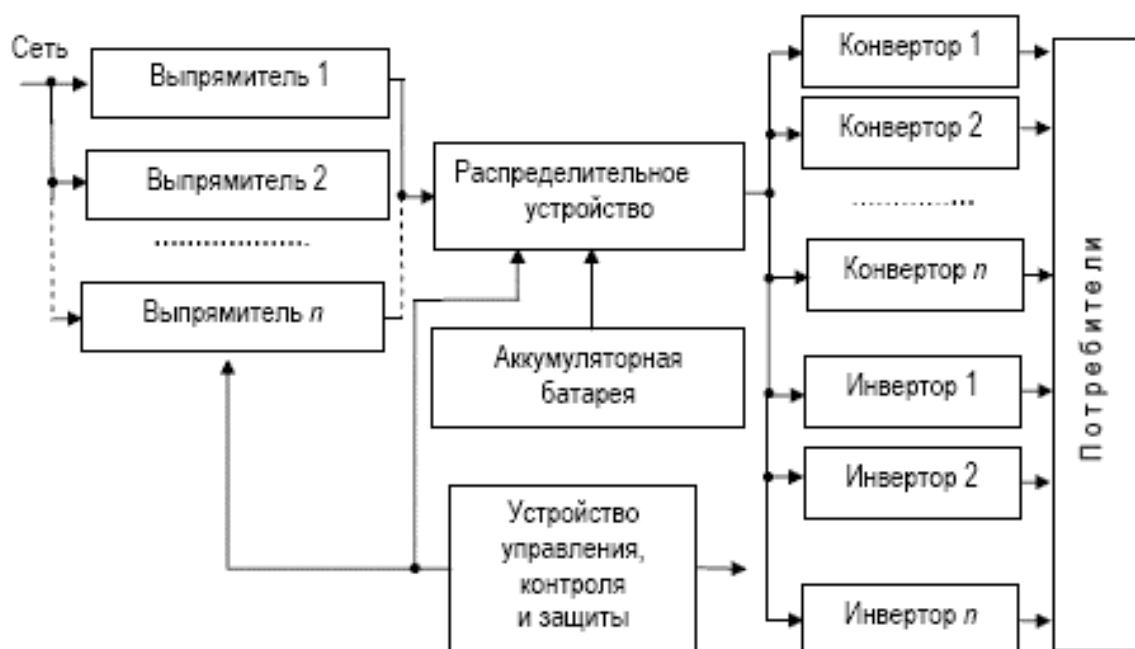


Рис. 2.1. Система электропитания потребителей постоянного и переменного тока

Структурное построение СБЭП переменного тока предусматривает использование двух основных вариантов: работающих в режиме «на линии» (в зарубежной терминологии *on-line* или *UPS – Uninterruptible Power Supply*) и «у линии», «резервный» (*off-line* или *SPS – Standby Power Supply*).

По первому варианту (рис. 2.2) питание потребителей (П) происходит постоянно через АИН, который независимо от состояния первичной сети обеспечивает высокое качество выходного напряжения СБЭП, находясь на одной линии с П. При этом замкнуты переключатели *S1*, *S4* и *S5*, выполненные на быстродействующих контакторах либо полупроводниках (тиристорах или симисторах). Зарядное устройство ЗУ обеспечивает заряд АБ. В случае провала напряжения сети ниже допустимого заданного предела П переходит на питание от АБ. Автоматический байпасный переключатель *S3* служит для синхронизированного подключения П к сети в случае аварии СБЭП, являясь, таким образом, элементом резервирования [37]. Для отключения СБЭП с целью проведения профилактических работ служит ручной байпасный переключатель *S2*. Основные преимущества СБЭП по схеме *on-line* заключаются в полной фильтрации и сглаживании любых колебаний входного напряжения и высоковольтных импульсов на входе, а также нулевым временем переключения при пропадании напряжения в сети без каких-либо переходных процессов на выходе. Все переключения с АИН на сеть и наоборот (включая и операции с байпасом) происходят при синфазировании напряжения АИН и сети. Примером СБЭП, построенных по схеме *on-line*, могут служить модели *UPStation GXT* производства компании «Liebert». Они оснащены стабилизатором входного напряжения с диапазоном стабилизации 120...276 В без перехода на АБ. К недостаткам схемы относится относительная сложность и более высокая стоимость, а также наличие дополнительных энергозатрат на двойное преобразование, снижающих общий КПД системы. СБЭП, работающие по схеме *on-line*, можно использовать, например, для питания серверов и рабочих станций локальных вычислительных сетей, а также любого другого оборудования, предъявляющего повышенные требования к качеству электропитания. Считается, что схема *on-line* является самым совершенным на сегодняшний день решением, позволяющим полностью защитить нагрузку от существующих неполадок электропитания.

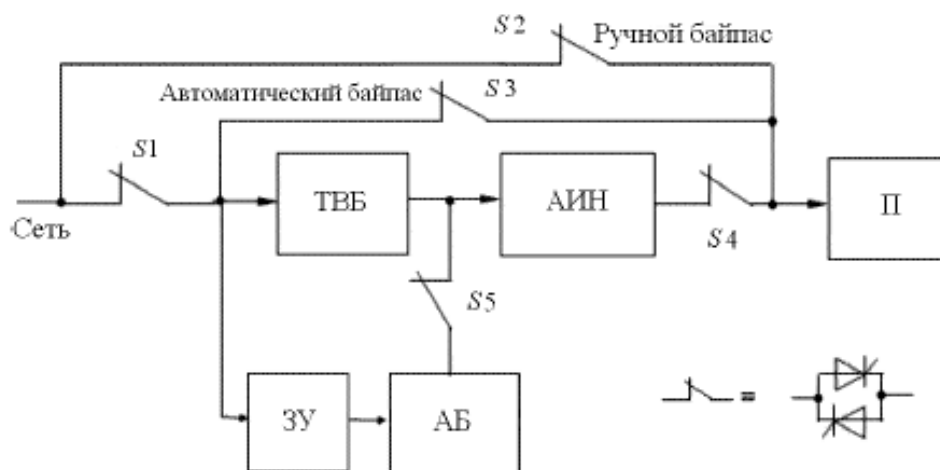


Рис. 2.2. Схема СБЭП типа «на линии» («on-line»)

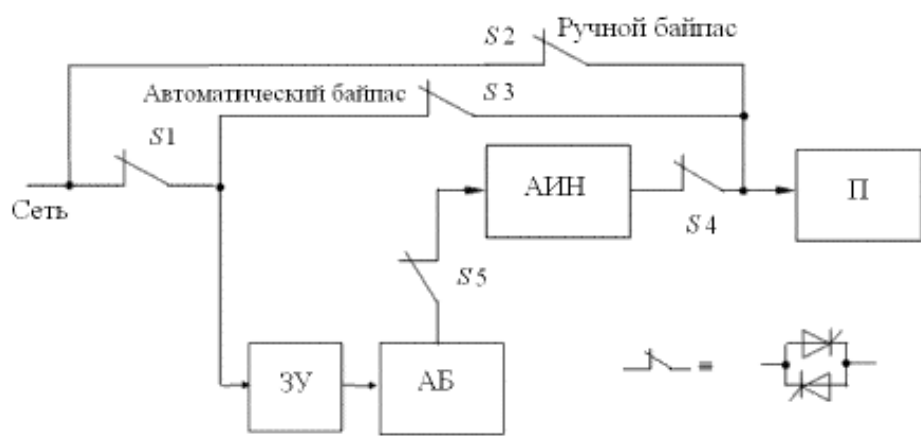


Рис. 2.3. Схема СБЭП типа «у линии» (off-line)

Второй вариант (рис. 2.3) предусматривает переключение П на АИН только в случае пропадания напряжения в сети. В нормальном режиме П питается от сети через переключатели $S1$ и $S3$. Переключатели $S2$, $S4$ при этом разомкнуты, а ЗУ обеспечивает заряд АБ. При пропадании сетевого напряжения включается переключатель $S4$ и отключается переключатель $S3$. Потребитель переводится на АИН, выходное напряжение которого синфазно сетевому. Обычно такие СБЭП дешевле построенных по «первому варианту». Преимущества схемы *off-line* заключаются в ее простоте и экономичности, а недостатки — в отсутствии стабилизации входного напряжения при работе потребителя от сети и наличии некоторого времени переключения (около 4 мс) при переходе в режим работы от АБ. СБЭП, работающие по схеме *off-line*, используются, например, для питания персональных компьютеров или рабочих станций локальных вычислительных сетей. Практически все недорогие маломощные СБЭП, предлагаемые на отечественном рынке, построены по схеме *off-line*.

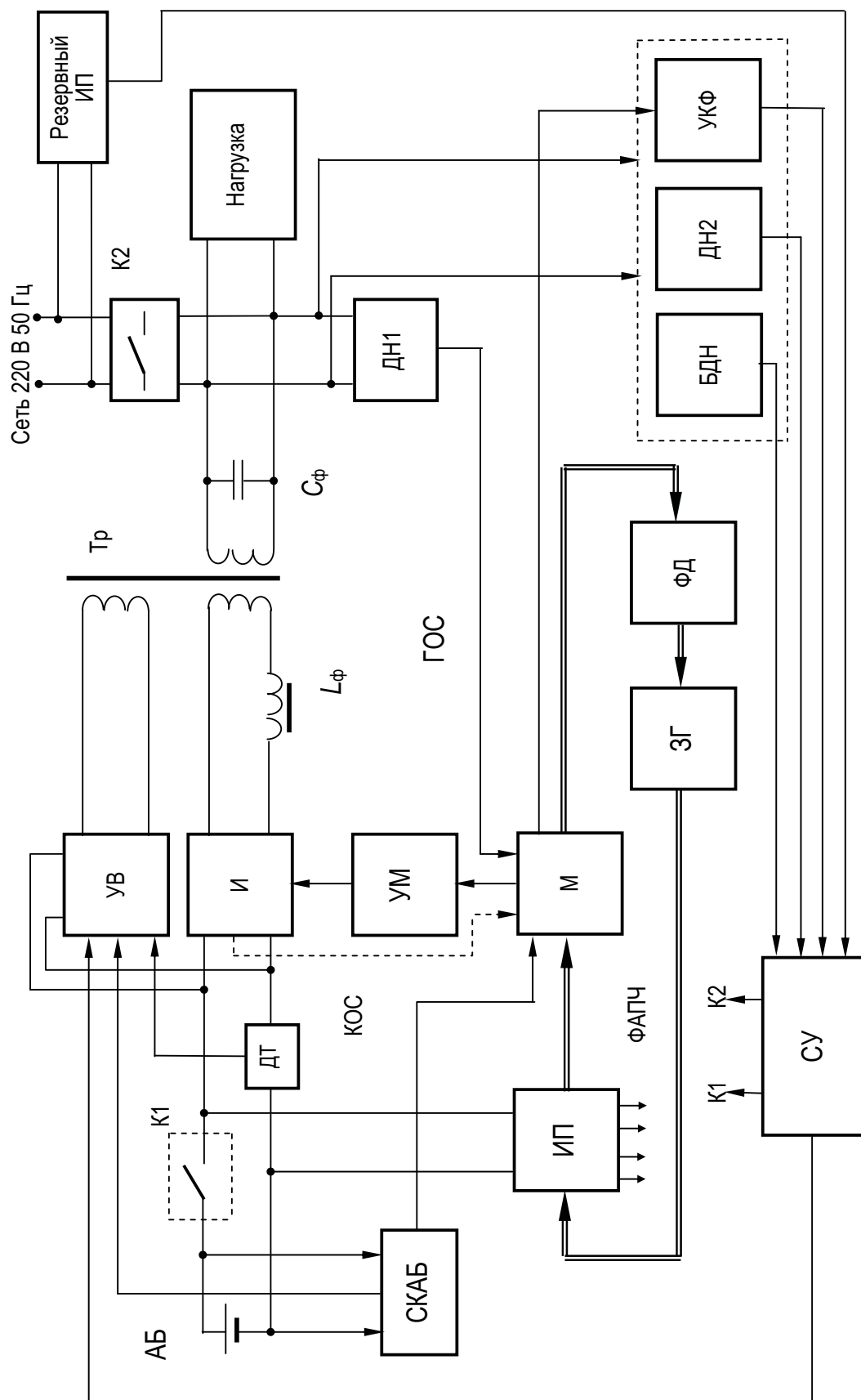


Рис. 2.4. Функциональная схема СБЭП типа ПОС-2000М АЛТ 3.211.201 М по схеме off-line

На рис. 2.4 в качестве примера схемы *off-line* представлена СБЭП АЛТ3.211.201М ФГНУ НИИ автоматики и электромеханики (г. Томск). СБЭП состоит из инвертора И с усилителями мощности УМ; силового трансформатора Тр и фильтра L_{ϕ} -С $_{\phi}$; источника питания ИП; управляемого выпрямителя УВ; контакторов К1 постоянного и К2 переменного тока; блока управления, коммутации и индикации СУ, устройства контроля фазы УКФ, датчиков напряжения БДН (быстродействующего) и ДН2; блока модулятора М, фазового детектора ФД и задающего генератора ЗГ; схемы контроля АБ (СКАБ). Силовая часть СБЭП построена на базе транзисторного мостового инвертора И с трансформаторным выходом, работающего в режиме однополярной ШИМ (см. гл. 3). Применение силового трансформатора Тр позволяет легко решить задачу согласования промежуточного звена постоянного тока и нагрузки, гальванически отделить схему управления и АБ от промышленной сети. При наличии сетевого напряжения И не работает, а энергия из сети через контакт контактора К2 поступает, фильтруясь, на нагрузку и через силовой трансформатор Тр на управляемый выпрямитель УВ. Происходит заряд АБ, все режимы которого определяет схема контроля батареи СКАБ. При этом быстродействующий датчик напряжения БДН постоянно следит за сетевым напряжением, а модулятор М, фазовый детектор ФД, задающий генератор ЗГ и источник питания ИП, образуя петлю фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ, определяют нулевое фазовое рассогласование напряжения сети и инвертора И. При выходе сетевого напряжения за пределы нормы СБЭП практически мгновенно переходит в режим инвертора, отключая сеть контактором К2 и питая нагрузку синусоидальным напряжением. СКАБ контролирует разряд АБ, сообщая персоналу о состоянии АБ. На протяжении всей работы выходное напряжение поддерживается постоянным за счет главной обратной связи ГОС астатического типа. Компенсирующая обратная связь КОС устраняет провалы постоянного напряжения АБ на полупериоде выходного напряжения, что улучшает его качество. При появлении сетевого напряжения датчик напряжения ДН2 контролирует его, петля ФАПЧ синхронизирует систему с сетью, после чего ДН2 и устройство контроля фазы УКФ через схему управления, коммутации и индикации СУ дают разрешение на безразрывное переключение нагрузки на сеть. При переключении система некоторое время работает параллельно с сетью, после чего И выключается и опять начинается заряд АБ. Представленная схема имеет защиту по току (ДТ — датчик тока) и от глубокого разряда АБ.

На рис. 2.5, а–г представлены осциллограммы переключения СБЭП ПОС-2000М с сети на АИН при номинальной нагрузке $P = 1,5$ кВт и нагрузке $P = 200$ Вт в различные моменты по фазе. В качестве переключателя, осуществляющего взаимодействие с промышленной сетью, использован контактор типа КНЕ-220 с временем переключения контактов порядка 10 мс. Характер переходных процессов определяется запасом энергии в контуре в момент пропадания напряжения сети, состоящем из конденсатора выходного фильтра, индуктивностей трансформатора и дросселя фильтра. При этом важное значение также имеют кривая намагничивания трансформаторной стали, величина и характер нагрузки, а также параметры контура обратной связи.

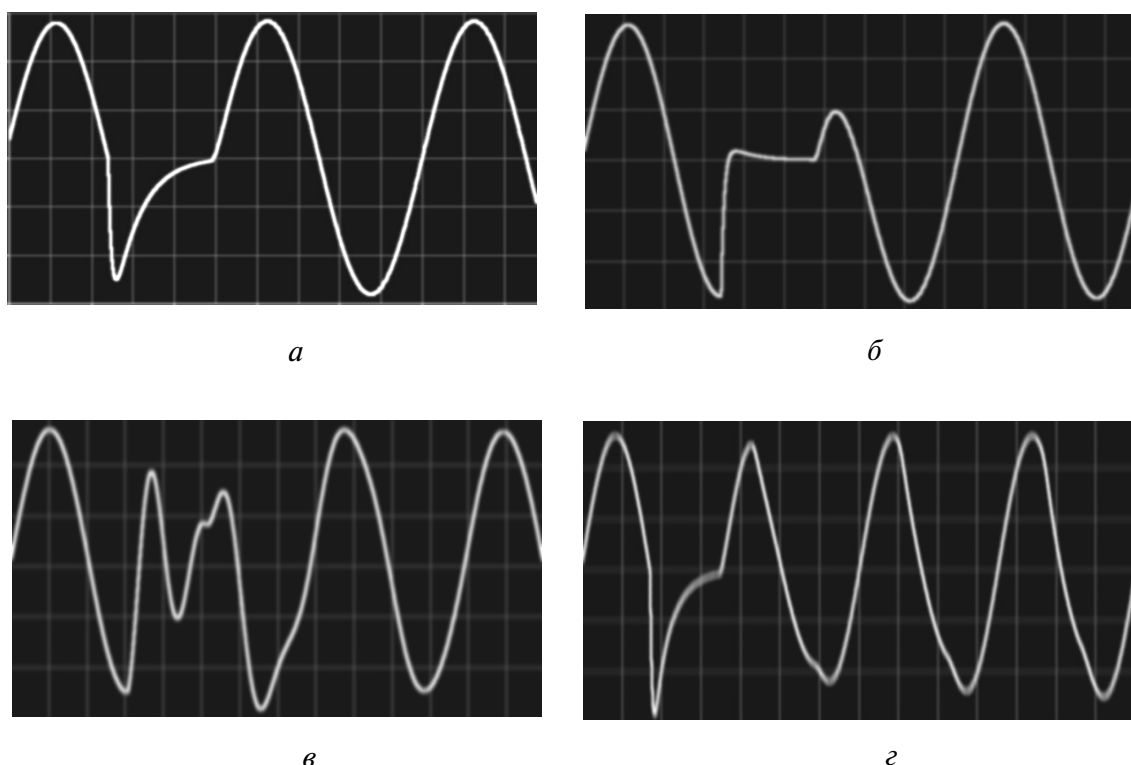


Рис. 2.5. Переходные процессы в СБЭП ПОС-2000М при пропадании сетевого напряжения и $\tau_{\text{перек}} = 10$ мс: а – номинальный режим $P = 1,5$ кВт, $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$; б – $P = 1,5$ кВт; $\varphi_{\text{откл}} = 270^\circ$; в – $P = 200$ Вт; $\varphi_{\text{откл}} = 270^\circ$; г – $P = 1,5$ кВт; $\varphi_{\text{откл}} = 180^\circ$ (при повышенной индукции трансформатора)

Логическим развитием «второго варианта» является объединение функций СБЭП и стабилизатора напряжения. Часто длительное повышение или понижение напряжения, являющееся результатом подключения или отключения на подстанции большого числа потребителей, может длиться часами. Однако переход на АБ в этом случае может быть не оправдан, хотя выход напряжения за допустимые пределы способен

привести как к сбоям работы потребителя, так и к его выходу из строя. В этом случае целесообразно, не используя энергию АБ, корректировать напряжение с помощью стабилизатора (С), функционально объединенного с преобразователем и переключателями. Фактически же стабилизатор с переключателями является трансформатором с управляемым коэффициентом трансформации. Переход на батарею происходит лишь в случае пропадания напряжения сети или при чрезмерном его понижении. Подобную разновидность СБЭП принято называть интерактивной (*line-interactive*) (рис. 2.6) [31].

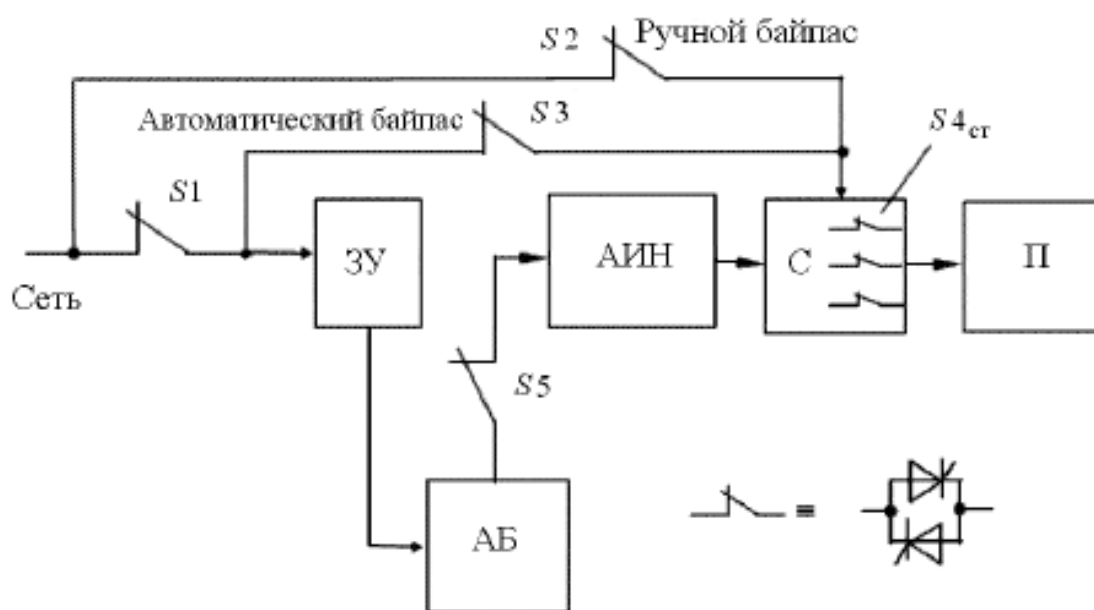


Рис. 2.6. Схема СБЭП типа «линейно-интерактивная» (*line-interactive*)

Схема *line-interactive* является удачным компромиссом между дорогостоящими системами *on-line* и относительно простыми *off-line*. Они используются для питания персональных компьютеров рабочих станций и файловых серверов локальных вычислительных сетей, офисного и другого технологического оборудования, критичного к неполадкам в электросети. Что касается ступенчатого трансформаторного стабилизатора, то большинство фирм-производителей применяют только повышающий трансформатор («бустер»), имеющий одну или несколько ступеней повышения. Однако встречаются СБЭП, оснащенные универсальным регулятором, работающим как на повышение (*boost*), так и на понижение (*buck*) напряжения. Например, серия СБЭП Smart Line снабжена универсальным регулятором, имеющим ступеньки как повышения, так и понижения входного напряжения. При этом допустимый диапазон изменения входного напряжения без перехода в «ав-

тономный» режим работы составляет 220 В (–27...+22) %. Линейно-интерактивные СБЭП строятся либо на основе управляемых трансформаторов (УТ) с автоматическими переключателями, либо по схеме «трипорт». В СБЭП с УТ трансформатор построен по классической схеме и обычно органично связан с АИН, выходным фильтром и автоматическими переключателями.

На рис. 2.7 в качестве примера представлена функциональная схема линейно-интерактивной СБЭП ПОС-10000 АЛТЗ.211.211 НИИ автоматики и электромеханики г. Томска со следующими техническими данными (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Входное напряжение промышленной сети, В	187...242, 50 Гц
Выходное напряжение, В	$220 \pm 5 \%$, 50 Гц $\pm 1 \%$
Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения, не более	5
Максимальная длительная выходная мощность, Вт, не более	10000
Тип применяемых АБ	<i>A500 Dryfit 12RG55</i> <i>12RG85 Sonnenschein</i>
Время непрерывной работы системы до полного разряда АБ: при выходной мощности 10 кВт при выходной мощности 2 кВт	для 12RG55 ~ 35 мин 12RG85 ~ 50 мин для 12RG55 ~ 2 ч 50 мин 12RG85 ~ 4 ч 10 мин
Номинальное напряжение набора АБ, В	180
Время полного автоматического заряда АБ от сети 220 В, 50 Гц	24 ч (80 % ~ 6 ч)
Время переключения потребителя с промышленной сети на систему, включая время обнаружения исчезновения сетевого напряжения, с, не более	0,004
Время переключения потребителя с системы на сеть, с	0
Вес преобразователя, кг	150
Вес аккумуляторного блока с, кг: • с АБ 12RG55 • АБ 12RG85	365 490
Габаритные размеры преобразователя (то же для аккумуляторного блока)	1500 × 600 × 420

По общепринятой классификации представленная СБЭП является системой *line-interactive*, что определяет ее энергетическую эффективность. Силовая часть системы построена на базе транзисторного

инвертора напряжения с автотрансформаторным выходом, работающего в режиме однополярной ШИМ. Применение силового трансформатора позволяет легко решить задачу согласования АБ и элементов фильтра Φ с нагрузкой, а также организовать интерактивную СБЭП по схеме с изменяемым коэффициентом трансформации.

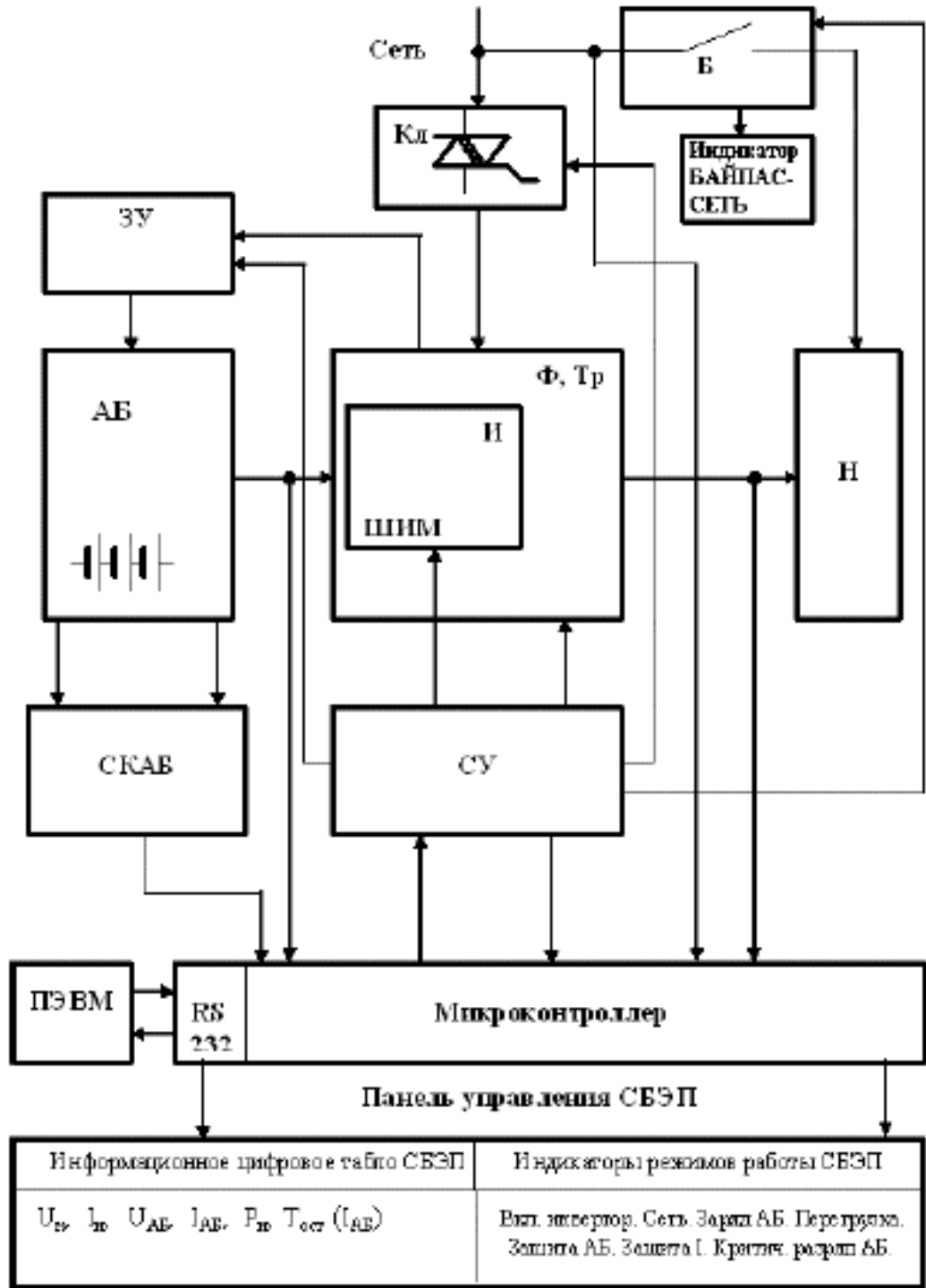


Рис. 2.7. Функциональная схема линейно-интерактивной СБЭП ПОС-10000 АЛТ3.211.211

При наличии сетевого напряжения инвертор не работает, а энергия из сети через ключ Кл поступает, фильтруясь, на нагрузку и через силовой трансформатор Тр на зарядное устройство ЗУ. Происходит заряд АБ, все режимы которого определяет схема контроля АБ – СКАБ. При этом быстродействующий датчик напряжения постоянно следит за сетевым напряжением, а схема фазовой автоподстройки частоты определяет нулевое фазовое рассогласование напряжения сети и инвертора. В таком режиме система стабилизирует напряжение на потребителе, корректируя напряжение промышленной сети, не переходя на АБ.

При выходе сетевого напряжения за пределы нормы вся система практически мгновенно переходит в режим инвертора, отключает промышленную сеть и питает потребитель синусоидальным напряжением. СКАБ контролируют заряд АБ, сообщая персоналу о ее режимах. На протяжении всей работы выходное напряжение поддерживается постоянным за счет главной обратной связи. При появлении сетевого напряжения происходит его контроль, система синхронизируется с сетью, после чего схема управления дает разрешение на безразрывное переключение потребителя на сеть. При переключении система некоторое время работает параллельно с сетью, после чего инвертор выключается, начинается заряд АБ и режим корректировки (стабилизации) сетевого напряжения. Представленная система имеет защиту от перегрузки по току, короткого замыкания и глубокого разряда АБ, перегрева ключей инвертора. Все режимы работы системы отображаются на передней панели и при наличии соответствующего программного обеспечения могут дублироваться на экране ПЭВМ посредством передачи данных через порт RS-232.

Для работы в автономном режиме предусмотрен так называемый «холодный запуск», когда в СБЭП сначала подготавливается заряд компенсирующего конденсатора с последующей плавной разверткой выходного напряжения. СБЭП подключается к сети и потребителю через обводной байпасный переключатель Б, позволяющий выводить ее из работы без отключения потребителя от сети, что является весьма полезной функцией.

СБЭП по схеме «трипорт» использует трансформатор специального изготовления с магнитными шунтами – шунт-трансформатор (Ш-ТР), обладающий дополнительно фильтрующими и стабилизирующими свойствами [38]. В этом смысле «трипорт» можно выделить в отдельную разновидность СБЭП (рис. 2.8). Фактически в такой СБЭП используется феррорезонансный трансформатор, включенный вместо ав-

тотрансформатора с отводами. Он стабилизирует напряжение на выходе СБЭП, что позволяет ей работать в широком диапазоне сетевых напряжений без переключения на АБ. Феррорезонансный трансформатор имеет значительную индуктивность. Во время работы СБЭП от сети в магнитном поле трансформатора накапливается большая энергия, которая питает нагрузку во время переключения на работу от АБ. Поэтому выходное напряжение такой СБЭП не имеет перерыва в момент исчезновения напряжения в электрической сети.

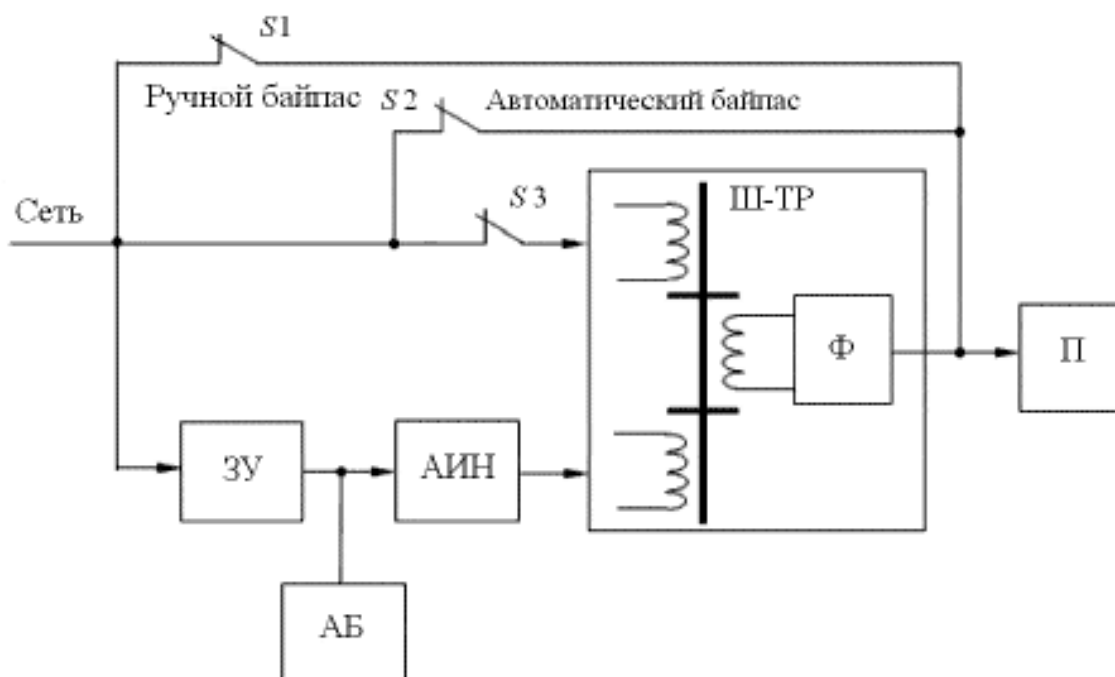


Рис. 2.8. СБЭП по схеме «трипорт» на основе шунт-трансформатора (СБЭП «феррорезонансного типа»)

В такой схеме потребитель может питаться либо от сети через Ш-ТР при выключенном АИН, либо от АБ через АИН при отключенной сети. Замечательно то, что возможен и промежуточный вариант, когда энергия к потребителю поступает сразу от АИН и сети. В этом случае Ш-ТР выполняет согласующую функцию. Фильтрация на выходе Ш-ТР допускает использование АИН с самым простым законом 180° -го управления (регулирования).

Остановимся несколько подробнее на «феррорезонансной» схеме СБЭП, тем более что такие системы представлены в России единственной серией *Ferrups* производства фирмы «*Best Power Technology*».

Феррорезонансный трансформатор был изначально предназначен для работы в качестве стабилизатора напряжения (изобретение Джозефа Сола — патент 1938 года — называлось: «Трансформатор постоянного

напряжения»). Феррорезонансный трансформатор представляет собой совокупность двух магнитных цепей со слабой связью между ними. Выходная цепь содержит параллельный колебательный контур, подпитываемый от первичной цепи для компенсации мощности, поступающей в нагрузку. Сам процесс ферромагнитного резонанса вполне аналогичен резонансу в линейных цепях, состоящих из индуктивностей и емкостей. В нелинейной цепи, такой как феррорезонансный трансформатор, резонанс используется для уменьшения колебаний напряжения во вторичной цепи. Любое магнитное устройство представляет собой прибор с нелинейной характеристикой. Если магнитный поток меньше некоторой граничной величины, то магнитное сопротивление прибора пропорционально магнитному потоку. Если же магнитный поток превышает предельное значение, то магнитное сопротивление прибора скачкообразно возрастает (говорят, что наступает насыщение).

В феррорезонансном трансформаторе одна из магнитных цепей (выходная) находится в режиме насыщения, а другая (входная) не достигает насыщения. Большие изменения входного напряжения не могут привести к значительным изменениям напряжения на выходе из-за насыщения выходной магнитной цепи.

Ток, потребляемый феррорезонансным трансформатором, почти синусоидальный. Наиболее важно то, что коэффициент гармонических искажений остается небольшим, независимо от того, какая нагрузка подключена к трансформатору — линейная или нелинейная. Таким свойством феррорезонансный трансформатор обязан слабой связи между входной и выходной магнитными цепями.

При полной нагрузке феррорезонансный трансформатор обеспечивает стабилизацию напряжения с погрешностью около 1 % при изменении напряжения на входе на 15 % относительно номинального. Наибольшие возможности феррорезонансный трансформатор предоставляет, если его нагрузка меньше номинальной. Так, при нагрузке около 50 % диапазон входных напряжений расширяется более чем до 50 % от номинального входного напряжения (рис. 2.9).

Особенностью входной характеристики трансформатора является то, что даже на режиме холостого хода резонансная цепь феррорезонансного трансформатора находится под напряжением и потребляет около 10 % номинальной мощности трансформатора. В тепловом отношении режим холостого хода является наиболее напряженным для феррорезонансного трансформатора.

Феррорезонансный трансформатор способен выдерживать любые перегрузки. При уменьшении сопротивления нагрузки выходное на-

пряжение снижается и трансформатор не перегревается. Даже при коротком замыкании выходной ток трансформатора ограничивается примерно 150–200 % от номинального тока. Суммарная мощность, потребляемая трансформатором от сети во время короткого замыкания, не превышает 10 % от номинальной.

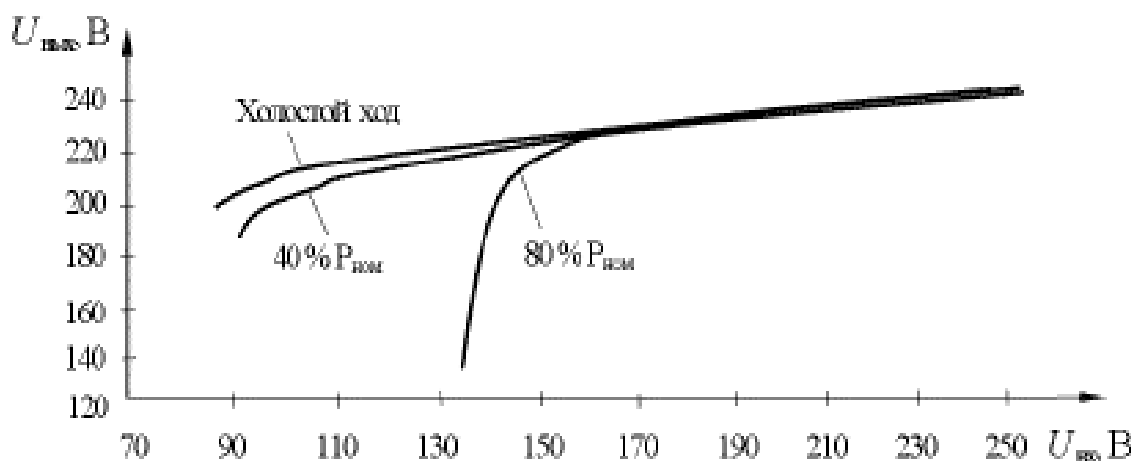


Рис. 2.9. Характеристика «вход–выход» для феррорезонансного трансформатора

Недостатком феррорезонансного трансформатора является зависимость выходного напряжения от частоты электрической сети. При изменении частоты на 1 % выходное напряжение изменяется примерно на 1–1,5 %. Увеличение частоты приводит к увеличению напряжения.

Как было отмечено выше, в случае сбоя электрической сети феррорезонансный трансформатор снабжает электричеством нагрузку за счет энергии, накопленной в его магнитном поле. Это продолжается 8–16 мс. Этого времени достаточно для всех необходимых переключений и выхода инвертора на номинальный режим работы. Феррорезонансный трансформатор также обеспечивает эффективное подавление шумов и импульсов, что дает возможность не использовать другие, специальные, схемы для их подавления. Кроме того, феррорезонансный трансформатор обеспечивает полную гальваническую изоляцию нагрузки от электрической сети. Это свойство повышает надежность систем бесперебойного питания и позволяет использовать феррорезонансные СБЭП для защиты компьютерных сетей.

На рис. 2.10 представлена схема СБЭП с дельта-преобразованием.

При наличии сетевого напряжения потребитель П питается им через фильтр $\Phi 1$, переключатель $S1$, электронный ключ на встречно-параллельных тиристорах и фильтр $\Phi 2$. При этом основной инвертор работает в режиме выпрямления, заряжая АБ. Дельта-инвертор, преобразуя энергию цепи постоянного тока в переменное напряжение, питает

дельта-трансформатор, вторичная обмотка которого включена последовательно с потребителем П. В случае если напряжение в сети меньше номинального, вторичная обмотка добавляет напряжение на потребитель П, а если напряжение больше — вычитает. Таким образом, дельта-трансформатор со своим инвертором работает в качестве стабилизатора напряжения на нагрузке. При этом через трансформатор проходит лишь часть мощности нагрузки («дельта»). Поэтому данная разновидность СБЭП получила название «СБЭП с дельта-преобразованием». При исчезновении сетевого напряжения основной инвертор переходит из режима выпрямления в режим инвертирования, преобразуя энергию АБ и питая потребитель П переменным напряжением. При этом переключатель $S1$ и его электронный тиристорный ключ выключаются. При появлении сетевого напряжения основной инвертор синфазуруется с сетью, включаются переключатель $S1$, его электронный тиристорный ключ и потребитель П переводится на сеть.

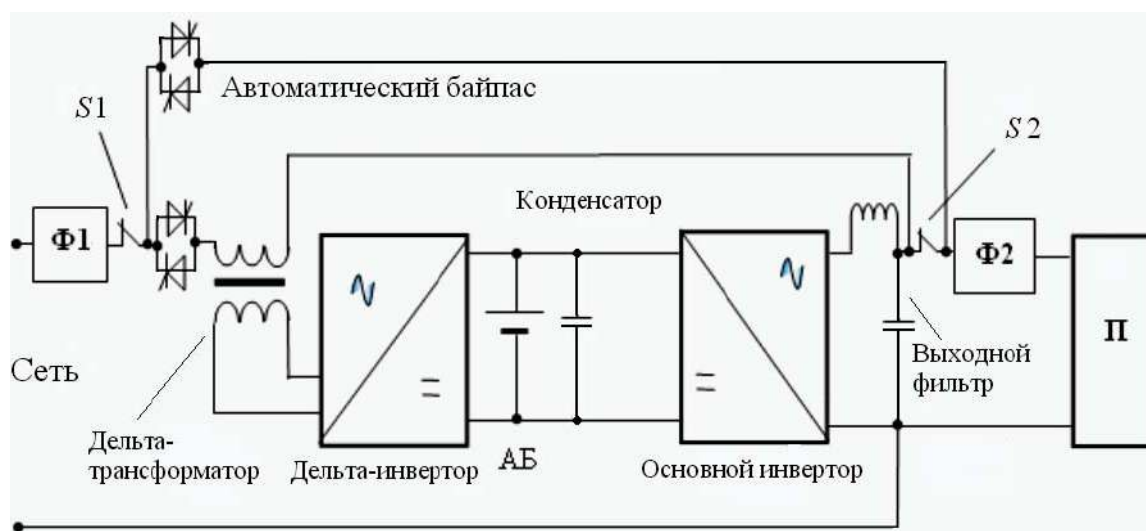


Рис. 2.10. СБЭП по схеме с дельта-преобразованием

По способу резервирования рассмотренные выше СБЭП подразделяются на: а) нерезервированные, б) с резервом от сети (с сетевым обводом) или байпасной сетью; в) с резервным преобразователем [3].

В нерезервированных СБЭП потребители постоянно получают питание от СП. Если в основной сети происходит авария или ее параметры выходят за пределы допустимых, СП без переключения продолжает получать энергию от АБ, так что перерывов в питании потребителей не наблюдается. Потребители в этой системе полностью изолированы от основной сети. Надежность системы в основном определяется надежностью преобразователя.

В СБЭП с сетевым обводом (байпас) в нормальном режиме потребители также получают питание от СП. При аварии в СП потребители отключаются от него и подключаются непосредственно к основной сети. Поскольку вероятность того, что СП и сеть одновременно неисправны, очень мала, то надежность этой системы значительно выше, чем нерезервированной.

В СБЭП с резервным СП в нормальном режиме потребители получают питание от сети, а СП находится в холодном или в горячем (работает на холостом ходу) резерве. При исчезновении напряжения в основной сети происходит подключение потребителей к СП. Наибольший перерыв в питании получается при холодном резервировании; если СП находится в горячем резерве, то перерыв такой же, как в СБЭП с сетевым обводом. Качество напряжения на зажимах потребителей целиком и полностью определяется основной сетью.

Резервирование СП осуществляется с целью повышения надежности электроснабжения. По способу резервирования СП СБЭП подразделяются на системы с резервированием замещением и с постоянным резервированием (системы с избыточностью). По степени резервирования СП системы могут быть с однократным и многократным резервом.

В системах с замещением один СП является основным, а другой — резервным и работает в режиме холостого хода, либо находится в выключенном состоянии (холодный резерв). При аварии в основном СП потребители от него отключаются и подключаются к резервному. Все СП выполняются абсолютно идентичными, что обеспечивает их полную взаимозаменяемость. Недостаток системы — наличие двух или более СП, каждый из которых рассчитывается на полную мощность. Это увеличивает массогабаритные показатели СБЭП и ведет к ее удорожанию. Кроме того, независимо от способа резервирования системы при переключении с основного СП на резервный неизбежен перерыв в питании потребителей.

В СБЭП с избыточностью все СП работают параллельно, при этом система рассчитывается так, чтобы при выходе из строя одного или всех резервных СП мощность остальных была достаточна для питания потребителей. Например, в системе, состоящей из трех СП, один из которых резервный (избыточный), каждый СП должен быть рассчитан на 66,6 % от общей мощности потребителей. Недостатки систем с избыточностью — высокая стоимость и сложность из-за необходимости осуществления параллельной работы. Тем не менее системы с избыточно-

стью являются единственно подходящими для питания ответственных потребителей, не допускающих никаких перерывов в питании и предъявляющих повышенные требования к надежности.

Структурная схема нерезервированной СБЭП, состоящей из ТВБ, АИН и АБ, фактически представлена на рис. 2.2, если в ней устранить сетевые обводы с переключателями S_2 , S_3 (соответственно, с обводами получаем резервированную СБЭП).

Следует отметить, что сетевой обвод («байпас») используется также при включении потребителей с большим пусковым током, например, двигателей. Тем самым повышается перегрузочная способность СБЭП. Если промышленная сеть является основным источником, перегрузочная способность системы возрастает в 6–8 раз, что удовлетворяет большинство потребителей. При этом надежность систем с сетевым обводом в 3–8 раз выше, чем без него в нерезервированной СБЭП [172].

На рис. 2.11 представлена резервированная схема СБЭП с замещением. С целью сокращения перерывов в питании используется, как правило, горячий резерв, при этом АИН работает синхронно и синфазно с сетью. Перерыв в питании при аварии в сети составляет не более четверти периода сетевой частоты.

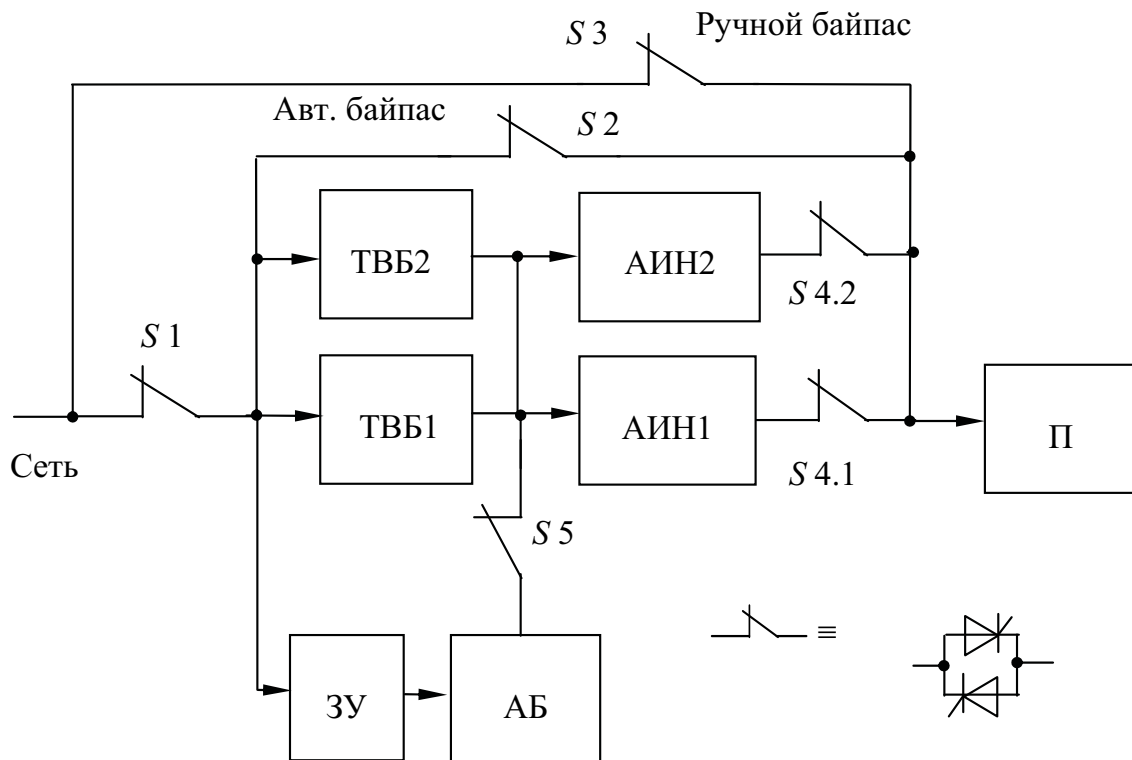


Рис. 2.11. СБЭП с резервным СП

Резервный АИН2 работает синхронно и синфазно с основным АИН1. При аварии в основном инверторе статический выключатель $S_{4.1}$ отключает потребитель от АИН1, а $S_{4.2}$ подключает его к АИН2.

Нерезервированная СБЭП с избыточностью чаще состоит из двух или трех АИН, один из которых является резервным (избыточным). Отсюда известно иное обозначение таких систем — « $N + 1$ ». Для предотвращения уравнительных токов все АИН имеют одно и то же напряжение, частоту и фазу. С целью достижения высокой надежности система максимально децентрализуется, т. е. каждый АИН имеет собственные, не зависящие от других регуляторы напряжения, частоты и др.

Параллельное соединение АИН позволяет создавать СБЭП разной мощности из унифицированных узлов и сократить количество типовых размеров АИН. Унификация изделий способствует сокращению сроков разработки и освоению промышленностью новых систем. Агрегатный принцип построения очень удобен при создании СБЭП, надежность которых возрастает с ростом количества независимых АИН, работающих на общую нагрузку.

Повышенная перегрузочная способность таких СБЭП и наличие байпасной цепи позволяют значительно повысить эффективность функционирования потребителей ответственных ТП при возникновении локальных аварийных ситуаций (короткие замыкания на различных участках комплекса и т. д.). В этом случае происходит переключение на байпасную цепь, обладающую значительной мощностью, и отключение аварийной цепи у потребителя из-за перегорания предохранителя, срабатывания электромагнитного контактора и т. п. После исключения аварийной цепи СБЭП автоматически (или вручную) возвращается в исходное состояние.

При возможности деления потребителя на различные группы нагрузки его электропитание может быть организовано от системы, структурная схема которой приведена на рис. 2.12 [172]. В этом случае АИН1 эксплуатируется в качестве обычного источника с выходом переменного тока для потребителя П1, а АИН2 — в качестве обычного источника с выходом переменного тока для потребителя П2. АИН3 используется в качестве общего резерва для инверторов АИН1 и АИН2. При повреждении АИН1 нагрузка переключается с помощью статических выключателей S_1 , S_2 . При повреждении АИН3 с помощью статических выключателей S_5 , S_6 происходит переключение на байпас. Аналогично коммутация осуществляется при выходе из строя АИН2. Вероятность одновременного выхода из строя всех источников питания невелика, так как происходит удваивание АИН и существенное повышение надежности всей СЭП.

Исключение нежелательных пусковых токов, обусловленных наличием у потребителей значительных входных емкостей, обеспечивается рядом искусственных приемов: медленной разверткой выходного напряжения СБЭП; введением токоограничительных устройств (сопротивлений, реакторов); последовательным включением групповых потребителей; включением потребителей через байпасную цепь с последующим переключением потребителей на АИН.

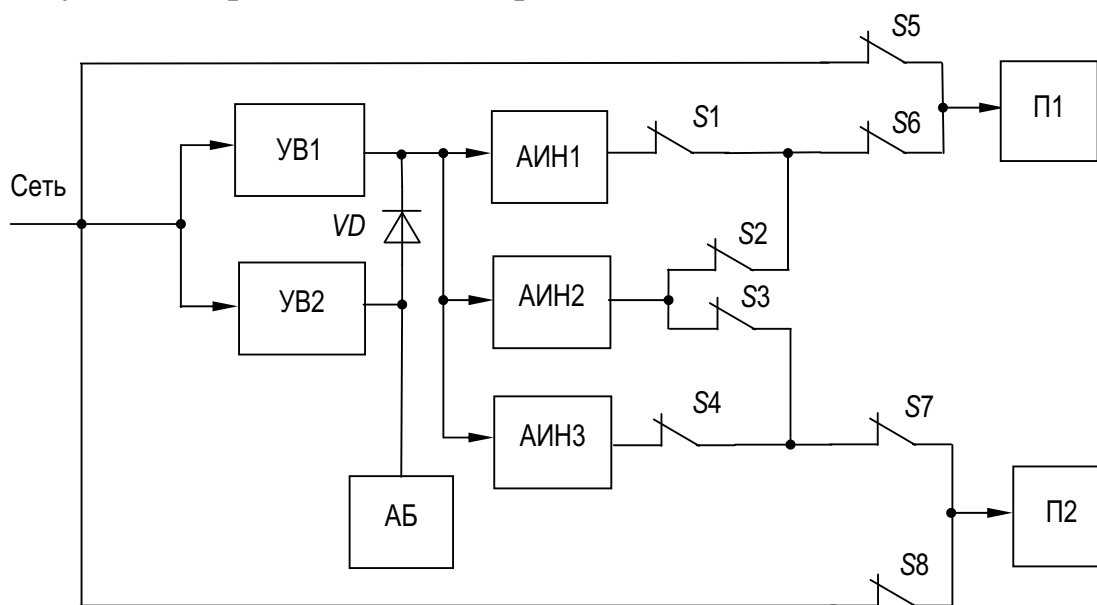


Рис. 2.12. СБЭП с резервным СП для двух групп потребителей

Представленные выше принципы резервирования СБЭП по параллельной схеме при работе на общий потребитель предусматривают их обязательную синхронизацию. Обычно связь между отдельными СБЭП осуществляется через специальные устройства управления («платы параллельной работы») с помощью сигнальных кабелей. У многих фирм цепь управления образует кольцо, поэтому разрыв в одной точке не приводит к выходу всей системы из строя. Для ее нормальной работы крайне желательно, чтобы включаемые в параллель СБЭП были одной мощности. При этом одна из СБЭП назначается ведущей, а остальные ведомыми. Выходное напряжение ведомых подстраивается к выходному напряжению ведущей с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При выходе из строя СБЭП ею может стать одна из ведомых.

Другая технология объединения на параллельную работу предусматривает постоянное отслеживание мощности, потребляемой каждой отдельной СБЭП в группе [39]. Для контроля за точным распределением нагрузки между параллельно работающими СБЭП используется факт зависи-

мости между фазой (частотой) выходного напряжения АИН и величиной его нагрузки. В параллельной системе каждый АИН отслеживает отклонения в уровне собственной выходной мощности от одного цикла к другому. Если разность значений выходной мощности между двумя соседними циклами у одного АИН увеличилась, это означает, что его напряжение опережает по фазе напряжение другого АИН. Для компенсации увеличения мощности будет незначительно уменьшена его выходная частота (обычно эти регулировки частоты составляют несколько МГц). Напротив, если разность значений выходной мощности между двумя соседними циклами у одного из блоков уменьшилась, т. е. напряжение отстало по фазе от напряжения другого блока, его выходная частота будет несколько увеличена.

Таким образом, чтобы оставаться в режиме синхронной работы, каждому АИН необходимо отслеживать только свою собственную выходную мощность. При таком способе параллельной работы распределение нагрузки между АИН каждой СБЭП осуществляется без обмена какой-либо дополнительной информацией, поэтому отпадает необходимость в коммуникационной связи между ними. Например, точность выравнивания выходной мощности СБЭП типа *Powerware* по данной технологии («*Hot Sync*») составляет 2 %.

Современные возможности процессорных систем позволяют конфигурировать самые различные системы резервирования. Примером такого подхода является архитектура *RPA* (*Redundant Parallel Architecture*) компании *GE Digital Energy*. По словам специалистов фирмы «Абитех», резервирование в системе *RPA* обеспечивается не только на уровне СБЭП, как таковой, но и на уровне внутренних узлов СБЭП. Так, например, если в одной из параллельных СБЭП вышел из строя байпас, то технология *RPA* позволит использовать его выпрямитель, аккумуляторные батареи и инвертор в составе системы. Это обеспечивает степень резервируемости критичных элементов на уровне $N + (N - 1)$. Например, в системе из четырех СБЭП три электронные схемы управления байпасом могут выйти из строя, а система будет по-прежнему активироваться по всем четырем байпасам.

Что касается «отслеживания» сетевого напряжения, то, прежде всего, блок анализа, находящийся в СБЭП, может не просто измерять действующее значение напряжения сети, но постоянно следить за формой синусоиды. Несколько раз за полупериод АЦП производит измерение мгновенного значения напряжения сети и после преобразования результатов измерения в цифровую форму передает его для анализа микропроцессору СБЭП. В памяти микропроцессора хранится образ иде-

альной синусоиды. Микропроцессор непрерывно сравнивает его с результатом измерения мгновенного значения напряжения.

Для выбора момента переключения с режима работы от сети на режим работы от батареи и обратно используются довольно сложные критерии качества сети. Например, современная СБЭП может переключиться на работу от батареи, если:

- частота сети (фазовый сдвиг) находится вне диапазона допустимых значений (фазовый сдвиг более 2° – 3°);
- мгновенное значение напряжения отклонилось от мгновенного напряжения идеальной синусоиды, хранящейся в памяти процессора, на величину больше допустимой;
- действующее значение напряжения стало меньше или больше допустимого.

Рис. 2.13 иллюстрирует еще один принцип резервирования — последовательный.

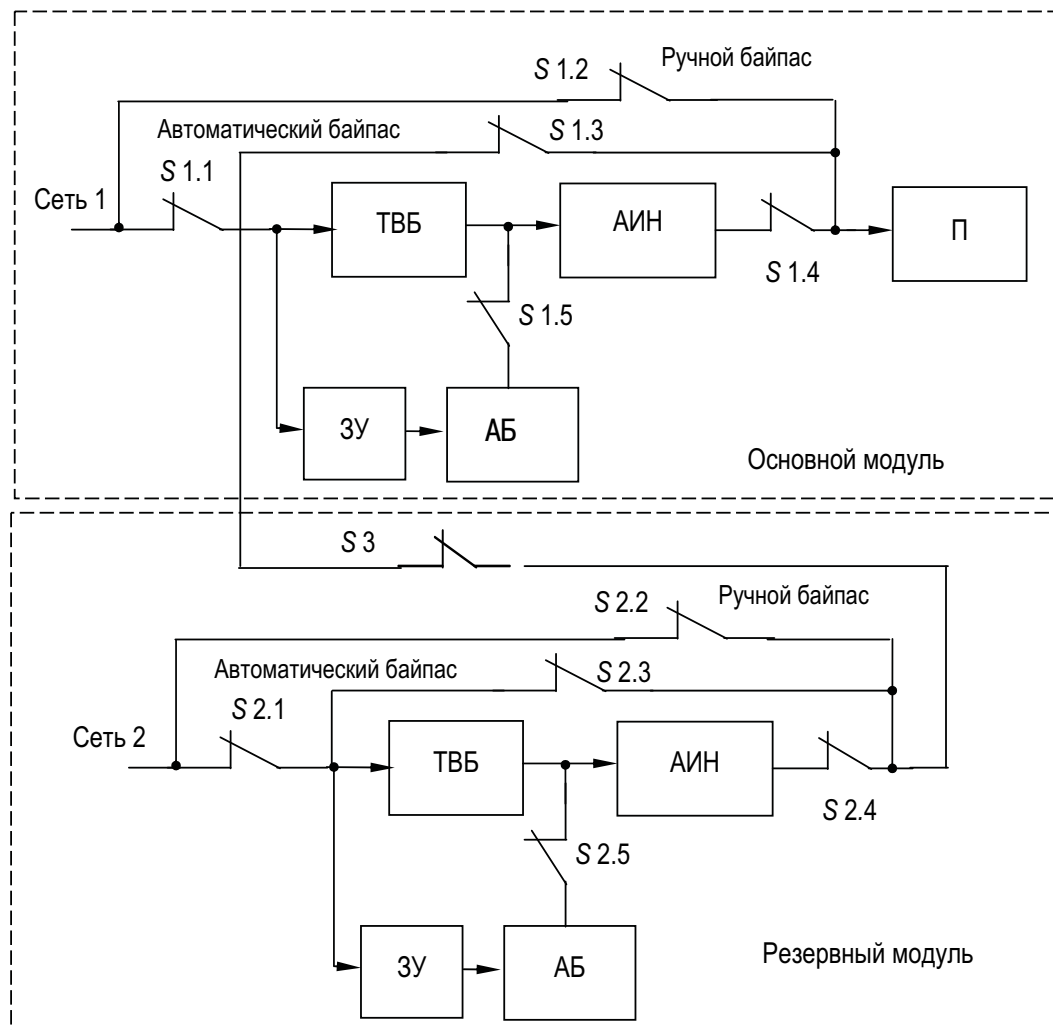


Рис. 2.13. Схема последовательного резервирования

Система с последовательным резервированием состоит из одного или нескольких основных модулей (СБЭП) и одного резервного. Каждый основной модуль работает на собственную нагрузку. Резервный модуль используется в качестве первичного источника питания байпасных входов основных модулей системы. Такая конфигурация позволяет производить техническое обслуживание резервного и основных модулей без отключения нагрузки и без снятия ее защиты. В этой схеме выходы основных модулей синхронизированы с выходом резервного модуля системы. При пропадании питания на входе одного из основных модулей СБЭП переходит в автономный режим работы, и нагрузка потребляет энергию АБ данной СБЭП. Если к моменту разряда АБ питание не восстановится, произойдет автоматический переход модуля на байпас, т. е. на резервный блок. Разумеется, в этом случае резервный блок становится недоступен для оставшихся основных модулей, и при переходе на байпас второго основного модуля подключенный к нему сегмент нагрузки получает питание от незащищенного входа системы.

Данная схема является хорошим способом модернизации существующей одномодульной СБЭП для повышения ее надежности путем включения дополнительного резервного модуля. Резервный модуль в данном случае работает в режиме *off-line*. При этом по байпасному входу основных модулей включен резервный модуль, а не «грязная» сеть. На основании этого схему с последовательным резервированием можно рассматривать как существенно более надежную в сравнении с одномодульной. Дополнительное преимущество системы с последовательным резервированием заключается в возможности использования модулей с разной мощностью и разнотипных модулей от разных производителей.

К недостаткам последовательной схемы можно отнести то, что для ее реализации требуется большее количество автоматических переключателей и защитных автоматов в сравнении с параллельными системами. Кроме того, система с последовательным резервированием нуждается в дополнительной цепи коммутации источника питания байпасных входов основных модулей (для систем из трех или более модулей), для модернизации простейшей двухмодульной системы (1 основной, 1 резервный модули) требуются большие затраты. Мощность каждого сегмента нагрузки ограничена мощностью соответствующего основного модуля СБЭП. Таким образом, применение схемы последовательного резервирования, с одной стороны, облегчает обслуживание модулей и переконфигурирование системы, но, с другой стороны, приводит к снижению ее надежности в целом.

Контрольные вопросы

1. Опишите и нарисуйте структурные схемы систем бесперебойного электропитания.
2. Проведите сравнительную оценку систем бесперебойного электропитания по стоимости, КПД, сложности структурной схемы.
3. Для чего служит байпасный переключатель?
4. На каких элементах выполняются входные, выходные и байпасные переключатели в системах бесперебойного электропитания?
5. Какая из систем бесперебойного электропитания наиболее защищает потребитель от отклонений и помех сетевого напряжения?
6. В каких системах бесперебойного электропитания используется дополнительный выходной стабилизатор напряжения?
7. Какую функцию выполняет дельта-трансформатор в системе бесперебойного электропитания с дельта-преобразованием?
8. Чем определяется время переключения потребителя с промышленной сети на инвертор системы электропитания типа *off-line*? Каков его порядок?
9. Каково время переключения потребителя с промышленной сети на инвертор системы электропитания типа *on-line*?

Глава 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СБЭП

3.1. Общие положения

Поскольку работа АИН, как центрального звена СБЭП, характеризуется некой последовательностью переключения полупроводниковых ключей, то качество выходного напряжения (тока) СБЭП определяется:

- а) алгоритмом этой последовательности;
- б) схемой фильтрации выходного напряжения (тока);
- в) способом организации обратной связи по выходному напряжению.

Алгоритм последовательности переключения ключей АИН непосредственно связан с типом импульсной модуляции. В настоящее время в СБЭП, как и в статических преобразователях частоты (ПЧ) для электроприводов переменного тока, в подавляющем большинстве случаев применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) выходного напряжения «классического» мостового АИН при синусоидальном законе модулирующей функции [40–57]. При этом несущая частота ШИМ-сигнала может достигать десятков кГц, что значительно облегчает фильтрацию выходного напряжения при помощи относительно малогабаритных LC -фильтров. При питании от СБЭП (или от ПЧ) электромеханической нагрузки важна форма выходного тока. Поскольку сам двигатель является фильтром, то, как правило, при ШИМ-регулировании и небольшом удалении двигателя от инвертора дополнительных фильтров не требуется.

Общая обратная связь, призванная поддерживать стабильным выходное напряжение СБЭП, при нерациональной организации может привести не только к неустойчивой работе системы, но и к искажению выходного напряжения.

Силовыми схемами, непосредственно формирующими алгоритмы ШИМ, являются однофазные и трехфазные АИН, выполненные на полевых транзисторах или на транзисторах типа IGBT (isolated gate bipolar transistor) – составной транзистор, состоящий из полевого входного, биполярного выходного транзисторов и обратного диода. На рис. 3.1 представлена схема однофазного мостового АИН, формирующего выходное напряжение по синусоидальной ШИМ.

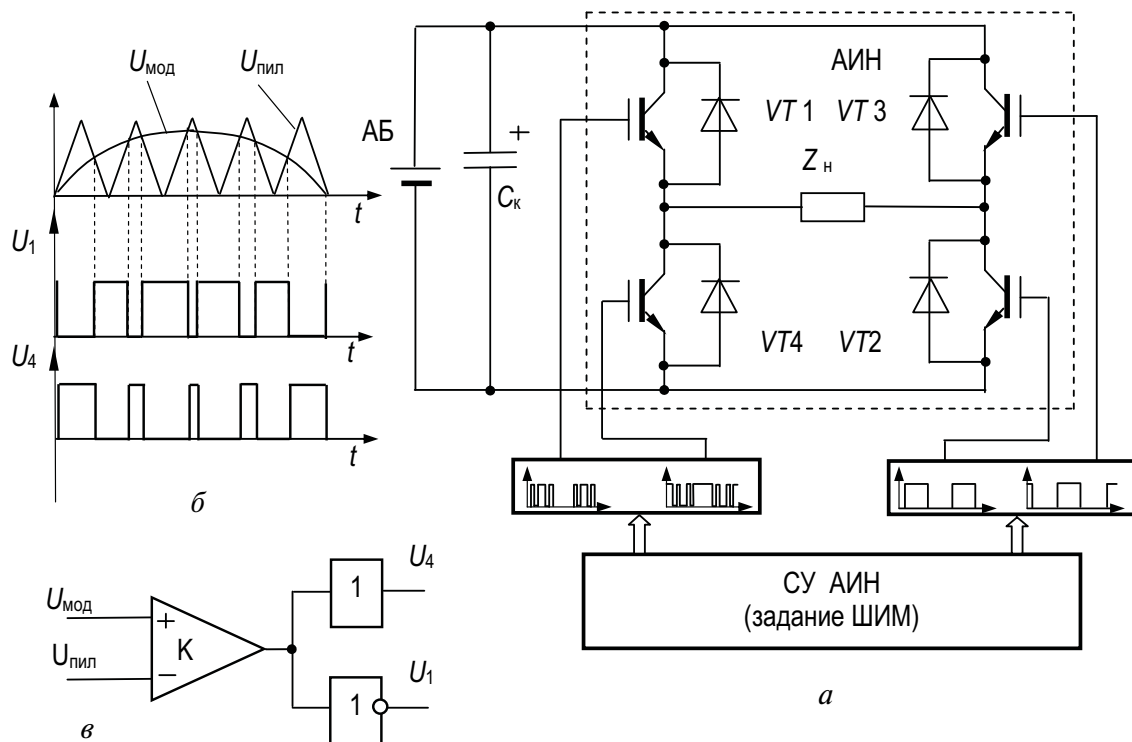


Рис. 3.1. Мостовой автономный инвертор напряжения с ШИМ (а), принцип формирования ШИМ-сигнала управления (б) и его схемная реализация

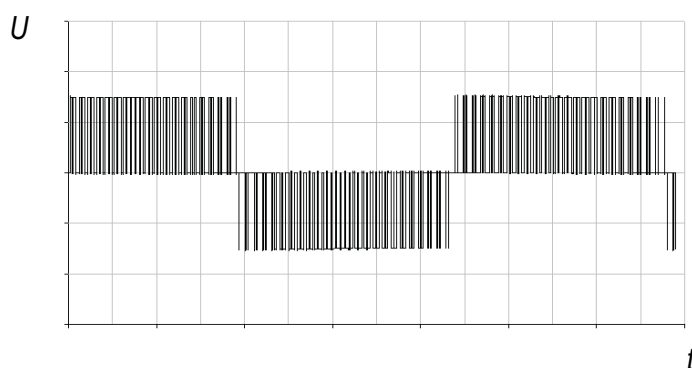


Рис. 3.2. Форма выходного напряжения однофазного мостового инвертора с ШИМ

Правая стойка АИН, состоящая из транзисторов VT2, VT3, управляется от противофазных сигналов основной частоты, например 50 Гц. Левая стойка, состоящая из транзисторов VT1, VT4, управляется противофазными и модулированными по длительности («ширине») по синусоидальному закону $U_{\text{мод}}$ сигналами. ШИМ-сигнал можно получить, сравнивая синусоидальное и пилообразное напряжение на компараторе К. При этом на нагрузке получается однополярное на интервале $0-180^\circ$ ШИМ-напряжение, форма которого приведена на рис. 3.2 (такую разновидность называют «скалярная» ШИМ). При необходимости получения синусоидальной формы выходного напряжения необходимо применить фильтр (см. разд. 3.3).

На рис. 3.3 представлена еще одна «нетрадиционная» разновидность схемы однофазного АИН, реализующего алгоритм двухполярной ШИМ и исключающего возможность протекания сквозных токов и перенапряжений на силовых транзисторных ключах. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ работают поочередно со 180° -м управлением, меняясь по полупериодам последовательностью синусоидальной ШИМ. Дополнительным достоинством АИН является гальваническая развязка нагрузки от АБ и возможность согласования напряжений.

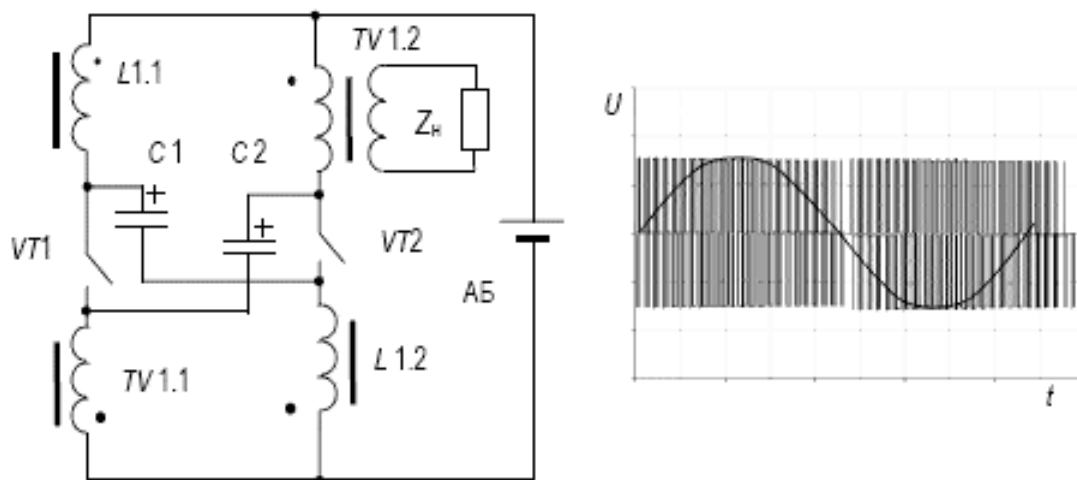


Рис. 3.3. Однофазный АИН с дросселями и трансформаторным выходом (а) и форма его выходного напряжения (б)

Трехфазные схемы АИН могут быть выполнены либо на основе однофазных с выходным трансформатором (рис. 3.4), либо по мостовой схеме (рис. 3.5).

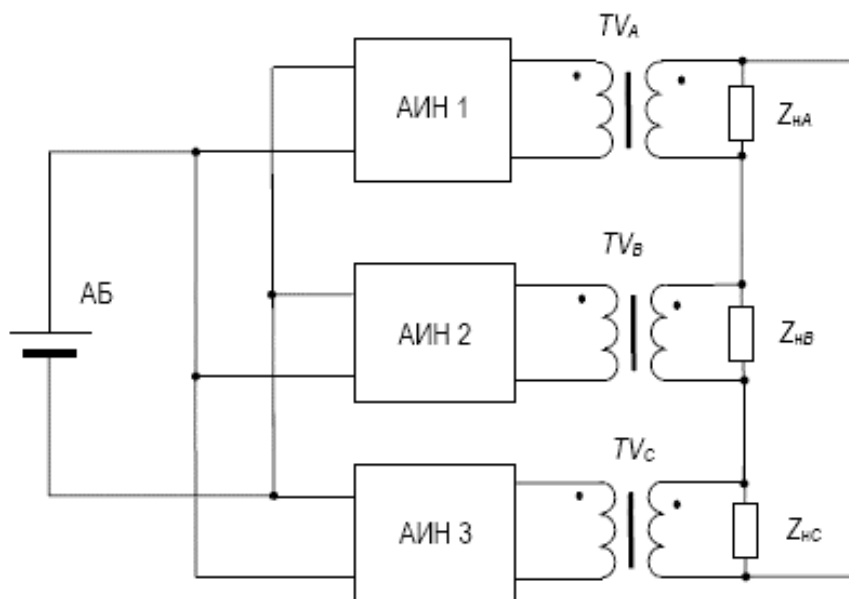


Рис. 3.4. Трехфазный АИН на основе однофазных схем

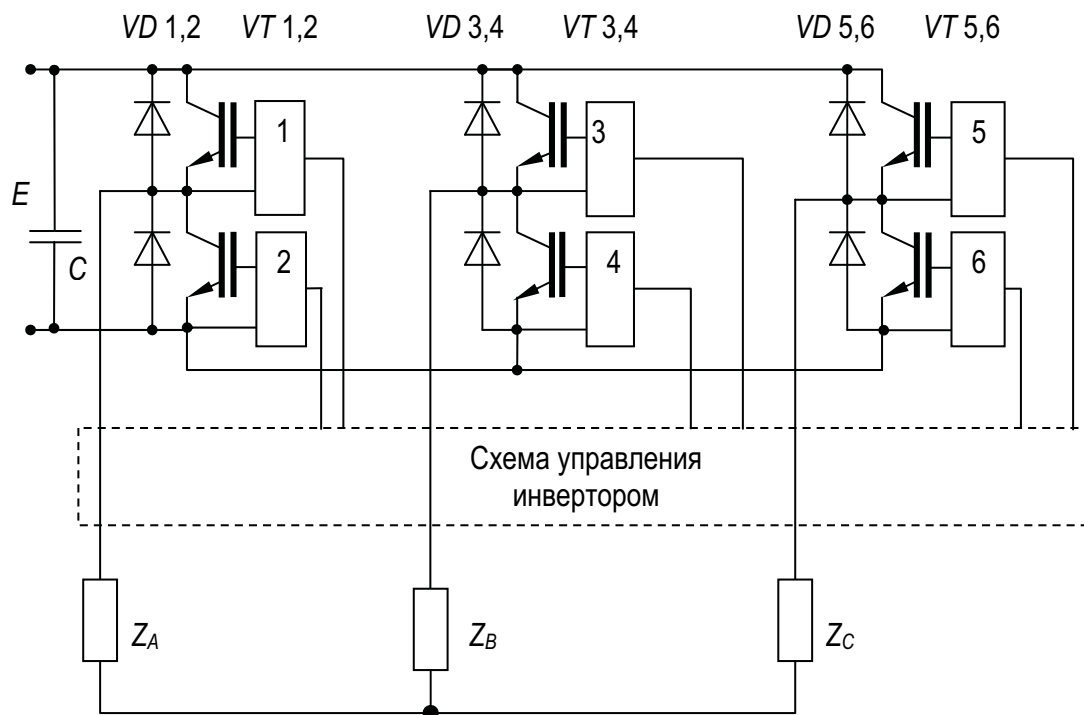


Рис. 3.5. Трехфазный мостовой АИН (1–6 – схемы управления транзисторами)

3.2. Разновидности алгоритмов ШИМ, применяемых в СБЭП

СБЭП строятся на основе АИН модуляционного типа. Классификация АИН модуляционного типа по структурным признакам рассмотрена, в частности, в [58]: по числу фаз (однофазные и многофазные АИН); по наличию выходного трансформатора; по характеристике источника питания; по частоте преобразования (равной или повышенной по сравнению с основной частотой инвертирования); по выходной частоте (фиксированной или регулируемой); по выходному напряжению (регулируемому или стабилизируемому (что, вообще говоря, и есть регулирование (*примеч. авт.*))).

Для получения на выходе ПЧ напряжения определенной формы и заданного качества, в большинстве случаев квазисинусоидального, используются методы непрерывного и дискретного синтеза [40, 41, 45, 56, 58, 59].

Дискретный синтез подразумевает аппроксимацию выходного сигнала, например кусочно-постоянной функцией, реализация которой представляет собой периодическую последовательность импульсов, в общем случае прямоугольной формы, модулированную по определенному закону. Модуляции подлежат параметры последовательности импульсов: амплитуда, длительность, фаза и частота. Однако, по-

скольку в инверторах, которые в основном применяются в ПЧ, плавное изменение амплитуд выходных импульсов неосуществимо, то наибольшее распространение получили времяимпульсные способы формирования и регулирования. В зависимости от вида кривой выходное напряжение ПЧ может быть одноуровневым, с паузами нулевого уровня или без пауз, и многоуровневым.

Способы формирования выходного напряжения ПЧ на основе АИН принято делить на две группы: одноимпульсные и многоимпульсные.

Основными разновидностями многоимпульсного формирования являются:

а) многоимпульсное формирование с частотой коммутации, кратной выходной частоте ПЧ, и с одинаковой длительностью импульсов в пределах полупериода;

б) многоимпульсное формирование с неодинаковыми интервалами между переключениями. При этом моменты переключения силовых ключей выбираются таким образом, чтобы устранить в спектре выходного напряжения ПЧ нежелательные гармоники. Данный метод получил название селективного исключения гармоник.

Для регулирования выходного напряжения применяют два основных способа: ШИМ — широтно-импульсная модуляция (частный случай — широтно-импульсное регулирование (ШИР)) и АИМ — амплитудно-импульсная модуляция (частный случай — ступенчатая модуляция СМ)).

В [60] предложена классификация способов ШИМ, которая охватывает практически все разновидности ШИМ:

1) по соотношению периодов модулирующего и несущего сигналов:

- синхронизированная ШИМ: отношение периода модулирующего сигнала и периода несущего сигнала составляет целое число, и оба сигнала совпадают по фазе в начале периода модулирующего сигнала;
- несинхронизированная ШИМ;

2) по значению уровня выходного напряжения на полупериоде несущей частоты:

- однополярная ШИМ: на полупериоде несущей частоты уровень импульсного сигнала принимает значения $+E$ и 0 или 0 и $-E$;
- двухполярная ШИМ: на полупериоде несущей частоты уровень источника принимает значения $+E$, 0 и $-E$, 0 ;
- многозонная ШИМ [41]: используется несколько уровней выходного напряжения источника;

- 3) по виду входного модулирующего сигнала (функции построения):
- синусоидальная;
 - трапецеидальная (и как частные случаи – треугольная и прямоугольная);
 - селективное исключение гармоник и т. д.;
- 4) по положению изменяемых фронтов импульсов на периоде несущей частоты:
- односторонняя ШИМ: модулируются положения переднего фронта, модулируются положения заднего фронта;
 - двухсторонняя ШИМ, модулируются положения переднего и заднего фронтов импульса;
 - симметричная ШИМ: смещения переднего и заднего фронтов импульса при постоянном по уровню входном сигнале равны по модулю и противоположны по знаку;
 - несимметричная ШИМ;
- 5) по степени соответствия длительности импульсов значениям функций построения:
- ШИМ первого рода: длительность импульсов определяется значением функции построения в моменты времени, совпадающие с модулируемыми фронтами импульса;
 - ШИМ второго рода: длительность импульса определяется значением функции построения в тактовые моменты времени;
 - ШИМ третьего рода: длительность импульса определяется значением функции построения, сдвинутой от модулируемых фронтов импульса на время, пропорциональное заданному числу K ;
- 6) по соотношению знаков функции построения и выходного импульсного сигнала:
- однотоновая ШИМ: двухполярной функции построения соответствует однополярный выходной сигнал;
 - двухтоновая ШИМ: двухполярной функции построения соответствует двухполярный выходной сигнал.

Приведенная классификация ШИМ учитывает процесс взаимодействия модулирующего и несущего сигналов с целью воссоздания на выходе модулятора входного (модулирующего) воздействия, однако без учета его возможного последующего изменения на выходе АИН, что в первую очередь относится к многофазным схемам. Управление многофазными АИН связано с созданием ШИМ-импульсов управления силовыми ключами и получения с помощью ПЧ импульсной последовательности, необходимой для потребителя, например для электродвигателя. Поэтому целесообразно

но говорить о едином понятии «способ управления АИН с ШИМ», тем более что такой подход согласуется с рядом оригинальных разработок, реализующих способы ШИМ в сочетании с алгоритмами переключения [61–64]. Вышеизложенной особенностью объясняется введение в классификацию способа «синтезированной ШИМ» [62, 64]. Сущность способа синтезированной ШИМ заключается в использовании в качестве модулирующих сигналов частей синусоиды и постоянного напряжения. При этом выходное линейное напряжение АИН представляет собой последовательность однополярных на полупериоде импульсов, модулированных по синусоидальному закону, причем на каждом тактовом интервале длительность импульса равна среднему значению синусоидальной кривой на этом интервале. Фазные напряжения при синтезированной ШИМ представляют собой симметричную систему «пятиуровневых» напряжений (рис. 3.6), аналогичную получаемой при двухполярной ШИМ [65].

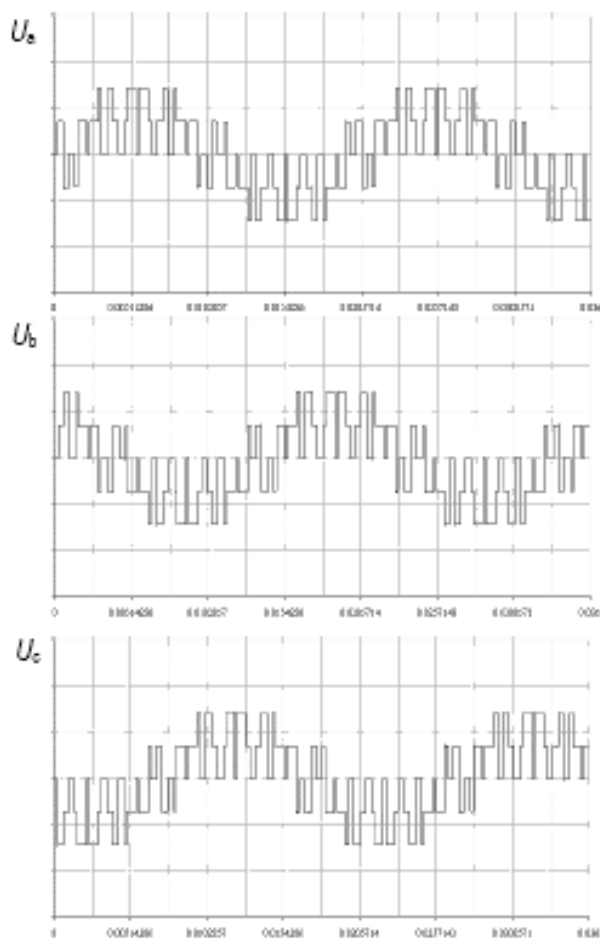


Рис. 3.6. Фазные напряжения АИН при двухполярной ШИМ

Следует отметить, что развитие способов ШИМ во многом обязано развитию способов управления ЭП переменного тока от АИН, поскольку на характеристики «СЭП — электродвигатель» существенное влияние оказывает именно алгоритм ШИМ.

Синтезированная ШИМ, предложенная в [64], фактически явилась одной из первых работ по созданию так называемых модифицированных ШИМ [65]. Эти способы основаны на базовых алгоритмах ШИМ и призваны устранить их недостатки, связанные прежде всего (при прочих равных условиях) с улучшением гармонического состава при меньшем числе переключений силовых ключей АИН [64], а также с лучшим использованием первичного источника питания (в частности АБ) [65].

Очевидно, что в случае гармонического сигнала задающего напряжения режим максимального неискаженного выхода АИН обеспечивается при равенстве амплитуды задающих воздействий U_m и амплитуды опорного сигнала ШИМ U_0 . В случае превышения амплитуды сигнала задающего воздействия на выходе АИН возникают низкочастотные нелинейные искажения.

В работе [65] показано, что симметричная двухполярная синусоидальная ШИМ обеспечивает в режиме максимального неискаженного выхода трехфазного АИН относительно напряжения питания U_d следующие амплитуды фазного и линейного напряжения:

$$U_\phi = 0,5U_d, \quad U_\pi = \frac{\sqrt{3}}{2}U_d \approx 0,866U_d. \quad (3.1)$$

Эффективные значения этих напряжений равны, соответственно:

$$U_{\phi.\text{эфф.}} = \frac{U}{2\sqrt{2}} \approx 0,353U_d; \quad U_{\pi.\text{эфф.}} = \frac{U_d\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \approx 0,612U_d. \quad (3.2)$$

При законе коммутации АИН без ШИМ со 180° -м управлением ключами имеем:

$$U_\phi = \frac{2U_d}{\pi} \approx 0,637U_d, \quad U_\pi = \frac{2U_d\sqrt{3}}{\pi} \approx 1,1U_d, \quad (3.3)$$

при эффективных значениях, соответственно,

$$U_{\phi.\text{эфф.}} = \frac{U_d\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,45U_d, \quad U_{\pi.\text{эфф.}} = \frac{U_d\sqrt{6}}{\pi} \approx 0,78U_d. \quad (3.4)$$

Таким образом, в сравнении со 180° -м управлением синусоидальная двусторонняя ШИМ дает ухудшение показателей использования напряжения источника питания приблизительно на 21,5 %.

Модифицированность ШИМ связана в понятием «предмодуляция» [65]. Устройство предмодуляции формирует в каналах задания ШИМ аддитивное модулирующее воздействие U_π , одинаковое для всех фаз АИН. При этом выходные сигналы устройства предмодуляции можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} U_a &= U_m \cos \Theta_u + U_\pi, \\ U_b &= U_m \cos(\Theta_u - 2\pi / 3) + U_\pi, \\ U_c &= U_m \cos(\Theta_u + 2\pi / 3) + U_\pi, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где U_m — амплитудное значение фазного напряжения; Θ_u — фаза задающего вектора напряжений.

Идея формирования предмодулирующего сигнала состоит в том, чтобы максимально использовать возможности так называемой потен-

циальной зоны нагрузки φ_i (см. штриховка на рис. 3.7, а, б), т. е. той зоны, в которой есть возможность увеличения опорного напряжения.

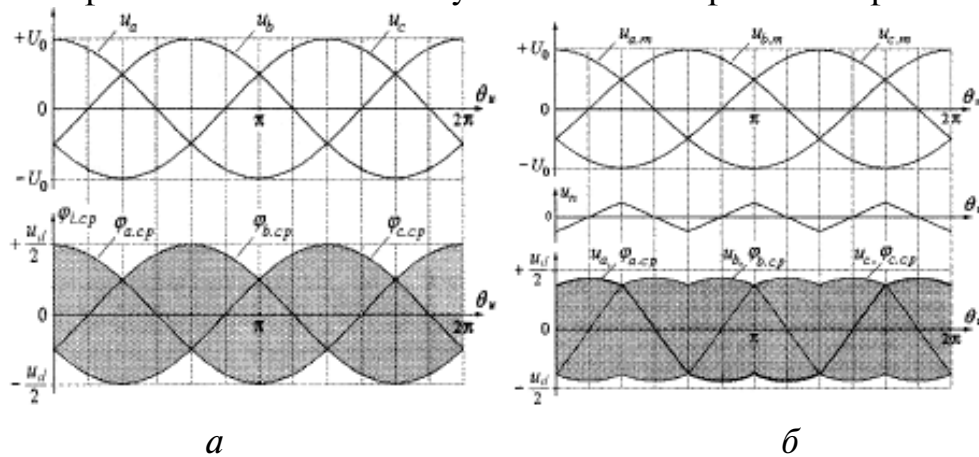


Рис. 3.7. Режим максимального неискаженного выхода при синусоидальной ШИМ (а) и с введением предмодулирующего сигнала (б)

При воздействии предмодулирующего сигнала происходит симметрирование потенциальной зоны нагрузки при всех значениях угла поворота задающего вектора. При этом предельно допустимое по условиям неискаженного выхода значение амплитуды внешних задающих воздействий составляет:

$$U_m = \frac{2U_0}{\sqrt{3}} \approx 1,155U_0. \quad (3.6)$$

Причем на 15,5 % увеличиваются амплитудные значения основных гармоник фазного и линейного напряжений на нагрузке:

$$U_\phi = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \approx 0,577U_d, \quad U_\pi = U_d, \quad (3.7)$$

а эффективные значения этих напряжений:

$$U_{\phi.\text{эфф.}} = \frac{U_d}{\sqrt{6}} \approx 0,408U_d, \quad U_{\pi.\text{эфф.}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}} \approx 0,707U_d. \quad (3.8)$$

Закон предмодулирующего воздействия может быть выражен и не так, как на рис. 3.7, б (линейным), а, например, в виде третьей гармоники от задающего сигнала [65].

Как было отмечено ранее, для нагрузки электромеханического типа важен гармонический состав фазного тока. Очевидно, что минимизация высших гармонических фазного тока дает и меньшие пульсации электромагнитного момента. При дополнительной предмодуляции эффективнее используется и энергия первичного источника СЭП.

Для оценки гармонического состава фазного тока необходимо произвести вычисление тока при нагрузке электромеханического типа в установившемся режиме. При этом рассмотрение электродвигателя переменного

тока как RL -нагрузки для АИН некорректно, так как вне зависимости от формы питающего напряжения (выходного напряжения АИН) в электродвигателе присутствует противоЭДС, и, как правило, синусоидальной формы ввиду распределения фазных обмоток в пространстве по соответствующему закону. В этом случае фазный ток I двигателя образуется как сумма векторов выходного напряжения АИН и противоЭДС ротора E_r .

$$L_{\text{ЭКВ}} \frac{dI}{dt} + R_{\text{ЭКВ}} I = U_{\phi 0}(\omega t) F(\omega t) - E_r \sin(\omega t - \Theta), \quad (3.9)$$

где $L_{\text{ЭКВ}}$, $R_{\text{ЭКВ}}$ — соответственно, эквивалентная индуктивность и активное сопротивление фазы электродвигателя; $U_{\phi 0}(\Theta)$ — амплитуда фазного напряжения АИН (электродвигателя); Θ — фаза ЭДС ротора (угол нагрузки для синхронных машин или угол между вектором тока ротора и ЭДС E_δ в воздушном зазоре для асинхронного двигателя — АД); $F(\omega t)$ — кусочно-постоянная функция, значение которой определяется при сравнении задающего (например синусоидального) воздействия и опорного несущего сигнала треугольной формы.

Перейдем в (3.9) к безразмерным переменным:

$$\omega t = \pi \tau; \quad I = \hat{i}; \quad \Theta = \pi \tau_0, \quad (3.10)$$

отсюда следует

$$\frac{di}{d\tau} + \frac{R_{\text{ЭКВ}} \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \omega} i = \frac{U_{\phi 0} \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \hat{i} \omega} F(\tau) - \frac{E_r \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \hat{i} \omega} \sin \pi(\tau - \tau_0). \quad (3.11)$$

Если выбрать $\frac{U_{\phi 0} \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \hat{i} \omega} = 1$, то $\frac{E_r \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \hat{i} \omega} = \frac{E_r}{U_{\phi 0}}$. то и при обозначении

$$\frac{R_{\text{ЭКВ}} \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \omega} = \alpha; \quad \hat{i} = \frac{U_{\phi 0} \pi}{L_{\text{ЭКВ}} \omega}; \quad M = \frac{E_r}{U_{\phi 0}} \quad (3.12)$$

уравнение (3.11) запишется в следующем виде:

$$\frac{di}{d\tau} + \alpha i = F(\tau) - M \sin \pi(\tau - \tau_0) \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq 2. \quad (3.13)$$

Решение уравнения (3.13) имеет вид

$$i(\tau) = i_0 e^{-\alpha \tau} + \int_0^\tau F(x) e^{-\alpha(\tau-x)} dx - \frac{M}{\sqrt{\pi^2 + \alpha^2}} \sin \pi(\tau - \tau_0 - \beta) \quad (3.14)$$

при $\sin \pi \beta = \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 + \alpha^2}}$, $\cos \pi \beta = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi^2 + \alpha^2}}$, т. е. $\text{tg} \pi \beta = \frac{\pi}{\alpha}$, а следова-

тельно $\beta \pi = \text{arctg} \frac{\pi}{\alpha} = \text{arctg} \frac{L_{\text{ЭКВ}} \omega}{R_{\text{ЭКВ}}}.$

Считая, что кусочно-постоянная функция

$$F(\tau) = C_k \quad \text{при} \quad a_{k-1} \leq \tau \leq a_k; \quad k = 1 \dots 2n_T, \quad (3.15)$$

где n_T — число треугольников на периоде, имеет период $T = 2$, найдем начальное условие i_0 , чтобы решение $i(t)$ было так же периодическим (с периодом $T = 2$), т. е. $i(0) = i(2)$:

$$i_0 = i_0 e^{-2\alpha} + \int_0^2 F(x) e^{-\alpha(2-x)} dx. \quad (3.16)$$

Следовательно,

$$i_0(1 - e^{-2\alpha}) = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^{2n} C_k e^{-\alpha(2-x)} \Big|_{a_{k-1}}^{a_k} = \frac{1}{\alpha} e^{-2\alpha} \sum_{k=1}^{2n} C_k (e^{\alpha a_k} - e^{\alpha a_{k-1}}) \quad (3.17)$$

и

$$i_0 = \frac{1}{\alpha(e^{2\alpha} - 1)} \sum_{k=1}^{2n_T} C_k (e^{\alpha a_k} - e^{\alpha a_{k-1}}). \quad (3.18)$$

Уравнение (3.14) можно записать в явном виде при $a_j \leq \tau \leq a_{j+1}$:

$$i(\tau) = e^{-\alpha\tau} \left\{ i_0 + \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^j C_k (e^{\alpha a_k} - e^{\alpha a_{k-1}}) \right\} + \frac{1}{\alpha} C_{j+1} [1 - e^{-\alpha(\tau - a_j)}] - \frac{M}{\sqrt{\pi^2 + \alpha^2}} \sin \pi(\tau - \tau_0 - \beta). \quad (3.19)$$

На основании выражения (3.19) был проведен анализ фазных токов электродвигателей при работе АИН СБЭП с выходным напряжением с однополярной и двухполярной ШИМ. При этом кусочно-постоянная функция $U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t)$ в первом варианте была образована как однополярная синусоидальная ШИМ с n_T импульсами на периоде и считалась фазным напряжением электродвигателя. Во втором варианте это напряжение являлось (по форме!) напряжением управления трехфазного АИН с двухполярной ШИМ. При такой форме управляющих импульсов фазное напряжение электродвигателя в (3.9) можно представить следующим выражением:

$$U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t)_{\text{дв}} = \frac{2U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t) - U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t)e^{-j120^\circ} - U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t)e^{-j240^\circ}}{\sqrt{3}}. \quad (3.20)$$

Выбор вида ШИМ и формирование функции $U_{\phi 0}(\Theta)F(\omega t)$ был заложен непосредственно в программе решения при поиске точек пересечения задающего синусоидального и треугольного сигналов с ампли-

тудой $U_{тр.}$, т. е. при реализации условий методом половинного деления:

$$\Phi(\tau) = k_p \sin \pi \tau - (-1)^k 2(n_T \tau - k), \quad (3.21)$$

где $k_p = U_{фз} / U_{тр.}$ — относительная амплитуда задающего сигнала.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.8, 3.9.

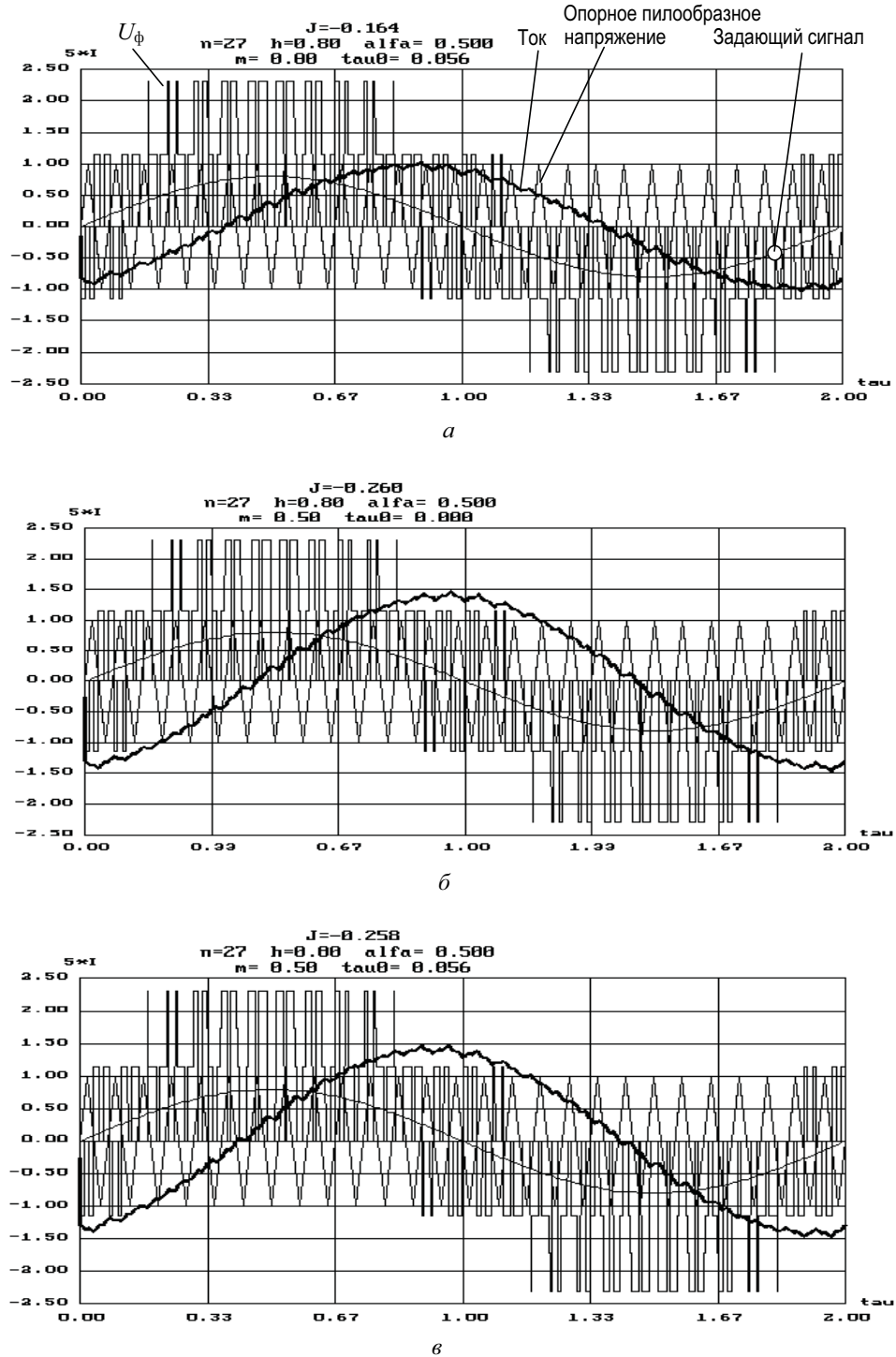


Рис. 3.8. Фазные токи АД при двухполярной модуляции $n_T = 27$: а — $\Theta = 10^\circ$, $M = 0,8$; б — $\Theta = 0^\circ$, $M = 0,5$; в — $\Theta = 10^\circ$, $M = 0,5$

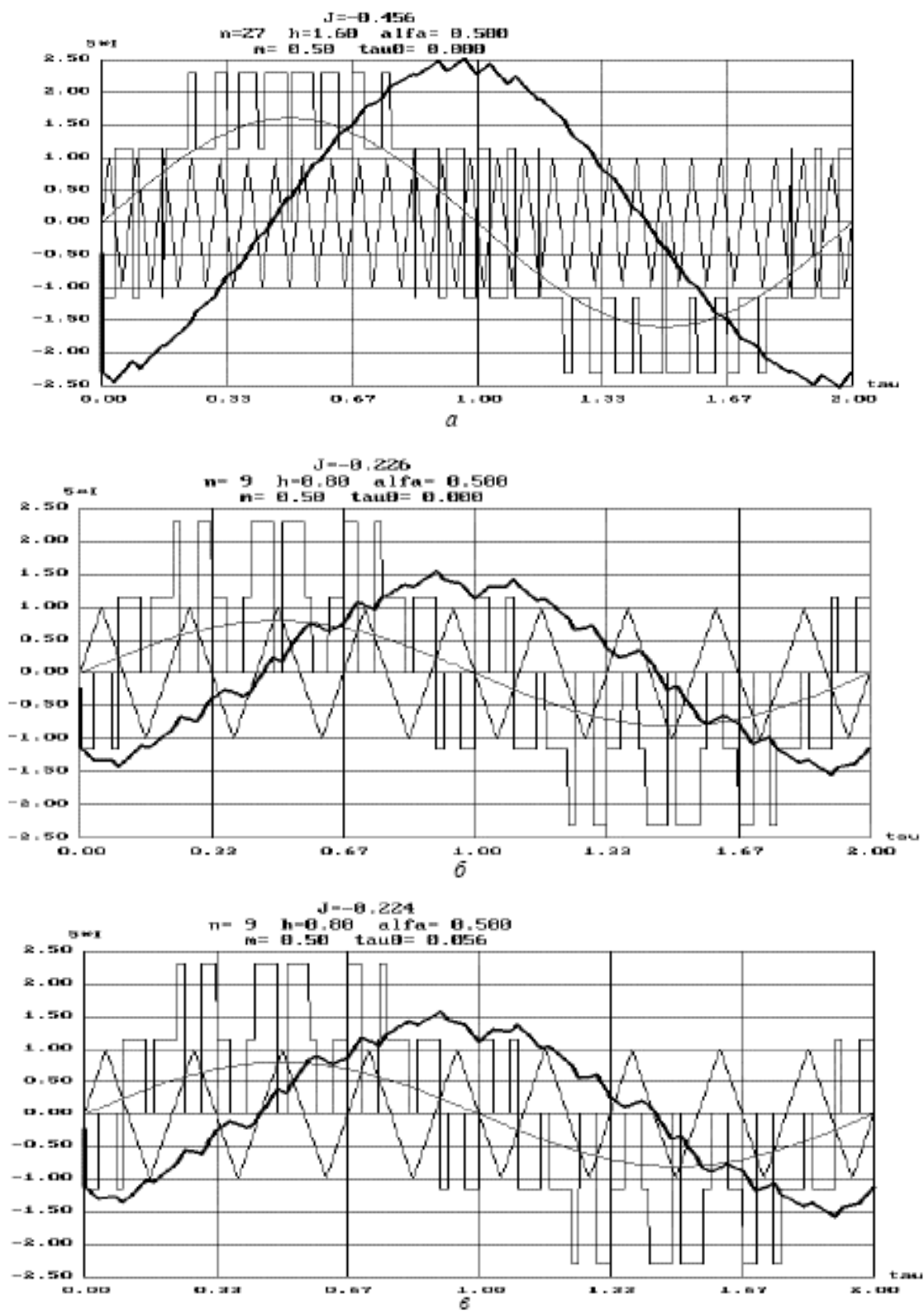


Рис. 3.9. Фазные токи АД при двухполярной модуляции:
а — $n_T = 27$; $\Theta = 0^\circ$; $M = 0,5$; предмодуляция; б — $n_T = 9$; $\Theta = 0^\circ$, $M = 0,5$;
в — $n_T = 9$; $\Theta = 10^\circ$, $M = 0,5$

Рис. 3.9, а иллюстрирует примененную автором предмодуляцию в трехфазном АИН СБЭП. Сравнение задающего синусоидального сигнала с треугольным напряжением происходит лишь на интервале $0 \dots \pi/3$. При этом теоретически амплитуда задающего синусоидального сигнала превышает амплитуду опорного, а фактически, при угле $\pi/3 \geq \varphi \geq 2\pi/3$, просто прекращается процесс сравнения. Однако в трехфазной системе напряжений на этом отрезке фазы А «работают» в сравнивающем режиме фазы В и С. Таким образом, амплитудное значение тока в фазе А (также, В и С) оказывается приблизительно выше в 1,5 раза относительно режима $k_p \approx 1$ при практически том же коэффициенте гармоник, но меньшем числе переключений ключей АИН. Зависимость коэффициента гармоник фазного тока K_{ri} от параметра k_p (т. е. фактически от глубины регулирования) при различных количествах импульсов на периоде представлена на рис. 3.10. Заштрихованная зона является зоной предмодулирующего режима при $k_p > 1$. Штриховая линия $K_{ri} = 17,4 \%$ характеризует режим $k_p \gg 1$, когда фазное напряжение, сформированное по закону синусоидальной ШИМ, вырождаясь, становится ступенчато-прямоугольным классического трехфазного АИН. Примеры спектральных составов фазного тока электродвигателей, соответствующие рис. 3.10 для $n_T = 9; 27$, представлены на рис. 3.11, а–з.

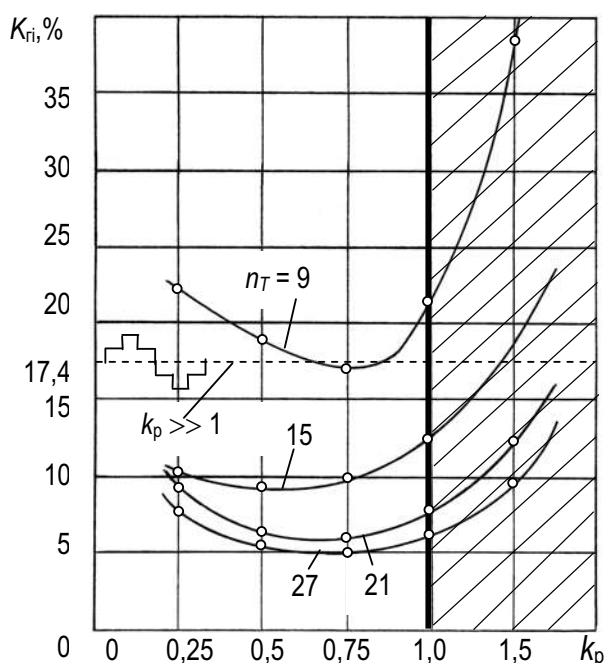


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента гармоник фазного тока при ШИМ от глубины регулирования k_p и числа импульсов n_T на периоде

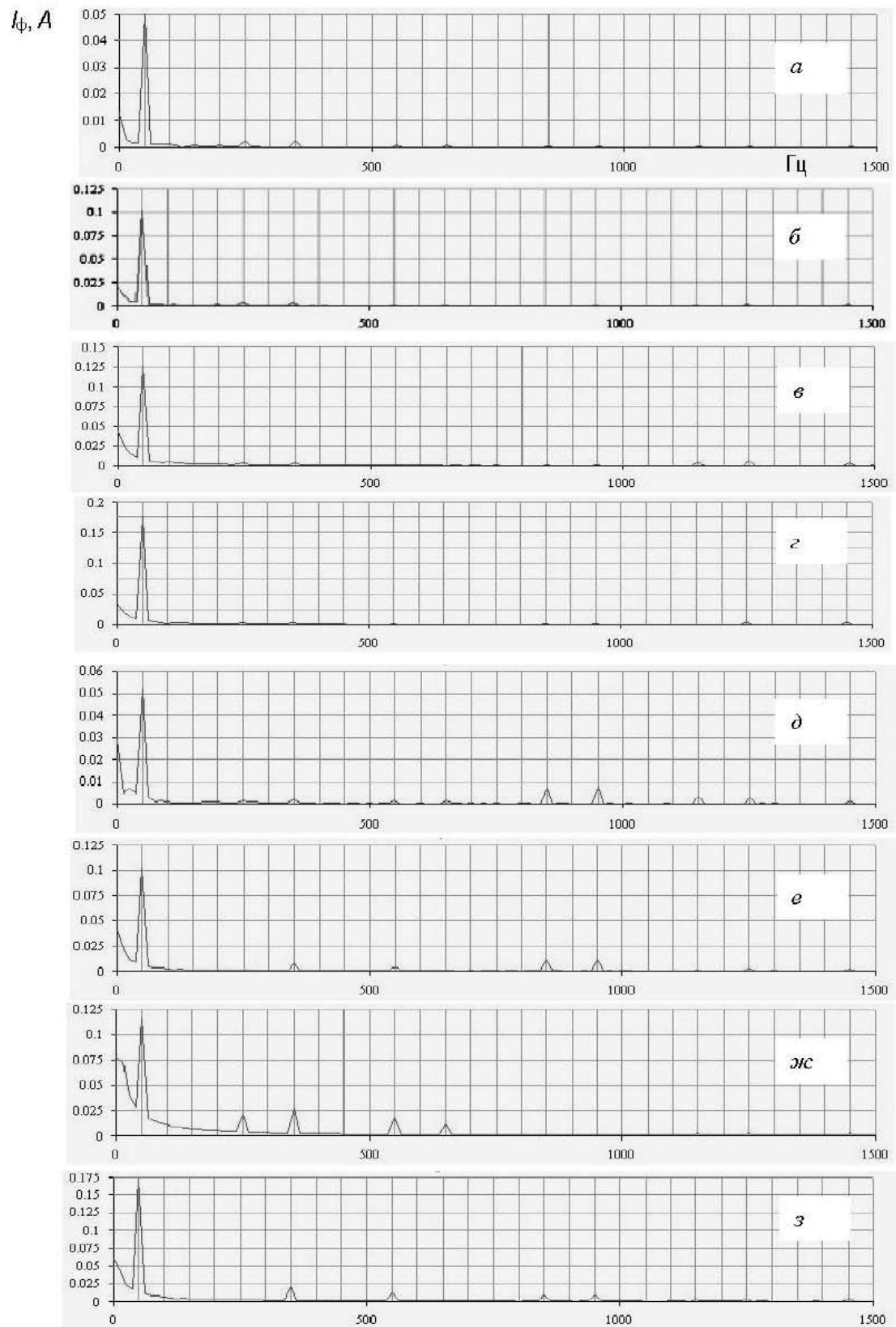
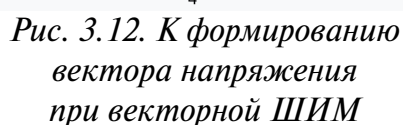


Рис. 3.11. Спектры фазного тока при: $n_T = 27$; а) $k_p = 0,25$; б) $k_p = 0,5$; в) $k_p = 0,85$; г) $k_p = 1,5$; $n_T = 9$; д) $k_p = 0,25$; е) $k_p = 0,5$; ж) $k_p = 0,85$; з) $k_p = 1,5$

Векторная ШИМ основана на модуляции «базовых» векторов. При этом, в отличие от скалярной ШИМ, коммутация ключей происходит между несколькими, заранее выбранными состояниями АИН, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения, приложенного к двигателю. В табл. 3.1 показаны схемы включения силовых ключей и векторные диаграммы для наиболее часто используемого набора базовых векторов, соответствующего стандартной 6-тактной коммутации [65, 67]. Имея восемь базовых векторов, два из которых «нулевые», а остальные сдвинуты в пространстве на 60° (эл.), можно воспроизвести



любой требуемый вектор выходного напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базовыми векторами текущего сектора U_i и U_{i+1} и нулевыми векторами. Амплитуда и фаза результирующего вектора напряжения зависят от скважности включения базовых векторов τ_i . В предельном случае, когда нулевые вектора не используются, годограф вектора результирующего напряжения представляет собой шестиугольник 2, описанный вокруг базовых векторов (рис. 3.12). С учетом того что амплитуда базового вектора составляет $2/3 U_d$, возможно формиро-

ники вектора фазных напряжений в режиме 180°-го управления АИН без ШИМ. Существуют и другие варианты выбора базовых векторов. Так, использование векторов, соответствующих парной реверсивной коммутации фаз двигателя, обеспечивает ту же самую максимальную амплитуду вектора результирующего напряжения, а переход к базовым векторам, соответствующим 12-тактной коммутации, позволяет увеличить выходное напряжение АИН уже на 27 %.

Таблица 3.1

Формирование базовых векторов в трехфазном АИН

Базовый вектор		Схема включения и векторная диаграмма			Фазные напряжения U_ϕ/U_d		
Название	Код C B A				U_C	U_B	U_A
0 (000)	0 0 0				0	0	0
$U_0(001)$	0 0 1				-(1/3)	-(1/3)	+(2/3)
$U_{60}(011)$	0 1 1				-(2/3)	+(1/3)	+(1/3)
$U_{120}(010)$	0 1 0				-(1/3)	+(2/3)	-(1/3)
$U_{180}(110)$	1 1 0				+(1/3)	+(1/3)	-(2/3)
$U_{240}(100)$	1 0 0				+(2/3)	-(1/3)	-(1/3)
$U_{300}(101)$	1 0 1				+(1/3)	-(2/3)	+(1/3)
0 (111)	1 1 1				0	0	0

Специализированные МК, имеющие аппаратную поддержку ШИМ, выпускаются такими фирмами, как «Motorola» (68HC705MC4, 68HC708MP16), «Intel» (8xC196MC/MD/MH), «Texas Instruments» и другими [67]. Обычно МК имеет ШИМ-генераторы, которые управляются несколькими (3–24) программно доступными регистрами. ШИМ-генераторы позволяют реализовывать синхронизацию каналов, формирование «мертвого» [65] времени, его компенсацию, выравнивание импульсов по фронту или по центру, имеет встроенные защиты от неисправностей, некоторые другие функции. Частоту несущего сигнала можно регулировать от 8 МГц до 125 Гц. В последнее время вместо встроенных ШИМ-генераторов МК оснащаются более универсальными средствами, которые, в том числе, реализуют и алгоритмы ШИМ. В МК фирмы «Motorola» (68HC16Y1, MC68336) использован таймерный сопроцессор *TPU* (*Timer Processor Unit*), в изделиях фирмы «Intel» (8xC196NP/NU) – интегрированный процессор событий *EPA* (*Event Processor Array*). Все перечисленные МК ориентированы на реализацию двухполярной ШИМ, которая, как указывалось, не позволяет получить наилучший гармонический состав выходного напряжения.

Таким образом, векторная ШИМ в первую очередь решает задачи электромеханической нагрузки, формируя вектор напряжения в заданном секторе кругового поля при образовании необходимого потокосцепления и скольжения (скорости) двигателя с целью получения, например, большого диапазона и плавности регулирования скорости двигателя. В этом смысле применение векторной ШИМ в АИН СБЭП логично и допустимо, поскольку основная задача СБЭП – поддержание на потребителе лишь напряжения заданного качества.

Для построения однофазных и трехфазных СБЭП возможно применение также и однополярной ШИМ, например [64]. Необходимо отметить, что в любом случае способ регулирования амплитуды основной гармоники не должен нарушать симметрию формы синтезированного напряжения относительно значения $\pi/2$ («четвертьволновая симметрия»). При постоянной выходной частоте СБЭП, что и имеет место на практике, четвертьволновая симметрия позволяет иметь на полупериоде как четное, так и нечетное количество импульсов. При этом схема задания эталонного синусоидального сигнала может формировать ступенчатый синус, используя всего четверть периода. Все возможные варианты однополярных ШИМ подробно рассмотрены в [64]. Автором данного пособия в СБЭП различных типов использовался ступенчатый задающий синусоидальный сигнал, вид которого представлен на ос-

циллограмме (рис. 3.13). Там же показано опорное треугольное напряжение, которое для исключения накопления ошибки интегрирования обнуляется непосредственно после момента сравнения с очередной ступенькой задающего синусоидального сигнала. В СБЭП со стабилизацией выходного напряжения по мгновенному значению выходного напряжения используется «гладкий» опорный синусоидальный сигнал.

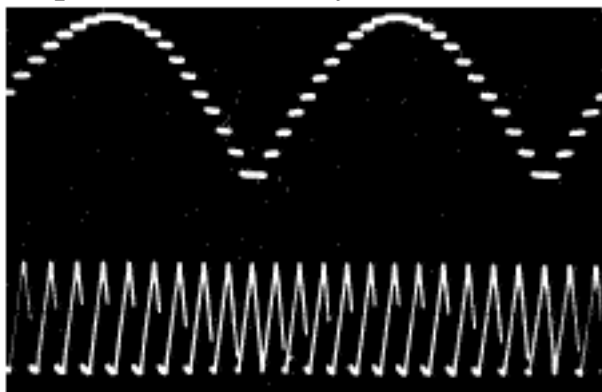


Рис. 3.13. Задающий ступенчато-синусоидальный сигнал и опорное треугольное напряжение в момент сравнения

Установленная мощность выходного фильтра зависит от спектрального состава выходного напряжения АИН. Оценка спектрального состава выходных напряжений АИН рассмотрена, например, в [60], где на основе разложения в ряд Фурье сигналов однополярных и двухполярных законов ШИМ для треугольного и трапецеидального входных сигналов представлены таблицы гармонических составляющих при различных глубинах регулирования. Подробному анализу синусоидальной ШИМ посвящены работы [41, 47, 50, 52, 56, 57, 60 и др.].

3.3. Фильтрация выходного напряжения в СБЭП

В СБЭП, использующих ШИМ, дальнейшее улучшение формы выходного напряжения достигается использованием выходных фильтров переменного тока. Анализу гармонического состава выходного напряжения АИН и методике проектирования фильтров посвящен ряд работ [42–57, 68 и др.].

Для целей дальнейшего анализа режимов СБЭП с точки зрения качества выходного напряжения и устойчивости работы с ответственными потребителями переменного тока от АБ рассмотрим работу выходного фильтра АИН. Основные требования, предъявляемые к фильтру, таковы:

1. Фильтр должен обеспечивать гладкую форму кривой выходного напряжения с низким коэффициентом гармоник. Требование гладкости кривой выходного напряжения обусловлено ограничением высоко-

частотных составляющих, которые создают помехи радиоприему. Несинусоидальность кривой, обусловленная низкочастотными составляющими, приводит к ухудшению энергетических и точностных характеристик потребителей.

2. Внешняя характеристика фильтра должна быть жесткой и не зависеть от характера нагрузки. Мягкая внешняя характеристика приводит к расширению диапазона регулирования, а это, в свою очередь: а) ухудшает гармонический состав выходного напряжения и требует применения фильтра с большими массогабаритными показателями; б) увеличивает мощность АИН; в) снижает стабильность выходного напряжения. В этом смысле фильтр должен быть согласован с нагрузкой (потребителем) при ее изменении в широких пределах от холостого хода до максимального по току значения.

3. Фильтр должен обладать слабой чувствительностью к изменению выходных параметров. Невыполнение этого требования деформирует частотные характеристики и, как следствие, может привести к ухудшению фильтрации высших гармонических составляющих.

4. Фаза выходного напряжения должна быть стабильной. Собственная нестабильность фазы фильтра осложняет в динамике работу контуров стабилизации выходного напряжения и стабилизации частоты с помощью петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), а, в частности, в многофазных СП снижает стабильность линейных напряжений. При параллельной работе несинфазность выходных напряжений преобразователей вызывает большие уравнивающие токи в инверторах.

5. С целью получения высокого КПД преобразования фильтр должен быть реализован на элементах с малыми потерями; потребление мощности от АИН на холостом ходу должно быть минимальным.

6. Стоимость, масса и габариты фильтра должны быть минимально возможными.

Хотя требования 1–6 являются противоречивыми, а их выполнение часто реализуется для конкретного потребителя, им в той или иной мере удовлетворяют три схемы: 1) простейший Г-образный фильтр (рис. 3.14, а); 2) двухконтурный полосовой (рис. 3.14, б), настроенный в резонанс на выходную частоту АИН; 3) заградительный (режекторный), в котором каждый контур настроен в резонанс на соответствующую гармонику (рис. 3.14, в).

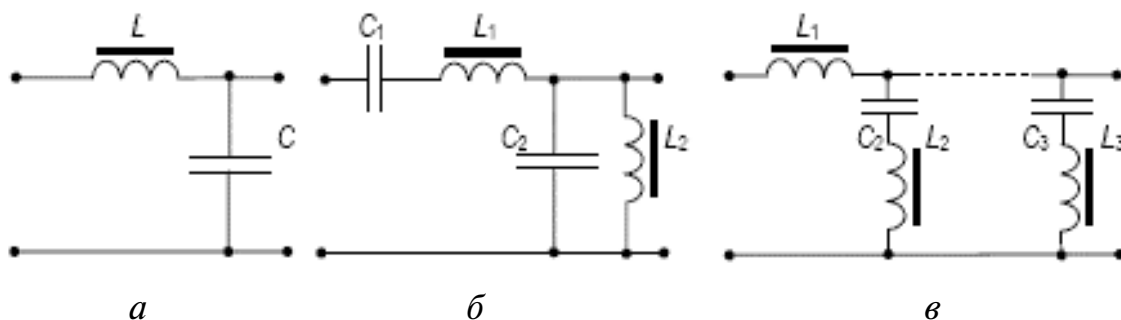


Рис. 3.14. Выходные фильтры СБЭП:

а – Г-образный; *б* – двухконтурный полосовой; *в* – заградительный (режекторный)

Режекторный фильтр по сравнению с простейшим Г-образным обладает следующими недостатками: 1) загружает инвертор токами высших гармоник, на которые настроены контуры; 2) слабо подавляет высшие гармонические, так как сопротивление последовательного контура выше собственной резонансной частоты и носит индуктивный характер. Это значит, что уровень радиопомех на выходных зажимах значительно больше, чем у простейшего. Кроме того, режекторный фильтр сложнее в настройке и чувствителен к изменению параметров. Коэффициент передачи и фаза первой гармоники для обоих фильтров не остаются постоянными, а изменяются в зависимости от величины и характера нагрузки. Кроме того, выходное напряжение АИН с ШИМ обладает полигармоническим составом. Следовательно, необходимо использовать несколько ветвей режекторного фильтра, настроенных на гармоники, имеющие максимальные значения напряжения, что усложняет фильтр, его настройку и СБЭП в целом. Полосовой и Г-образный фильтры одинаково хорошо подавляют высшие гармоники и слабо чувствительны к изменению параметров. Но простейший Г-образный фильтр обладает мягкой внешней характеристикой и загружает инвертор емкостным током. Несмотря на простоту схемы и детальный анализ этого фильтра, проведенный рядом авторов, расчет его при работе на нагрузку, изменяющуюся в широких пределах, представляет собой довольно сложную задачу и не всегда может быть выполнен с приемлемыми технико-экономическими показателями для СБЭП в целом. Полосовой фильтр свободен от всех вышеперечисленных недостатков, он в большей степени, чем остальные фильтры, удовлетворяет сформулированным требованиям, и поэтому находит широкое применение в СЭП с высокими требованиями к качеству выходного напряжения. Коэффициент передачи по основной гармонике такого фильтра может быть равен единице. Однако следует все же отметить, что порой применение такого фильтра не оправдано с экономической точки зрения для выходных напряжений АИН, сформированных по закону синусоидальной ШИМ с большим числом импульсов

на периоде. Большой смысл имеет применение такого фильтра с напряжением АИН прямоугольной формы.

На рис. 3.15, *а, б* представлены семейства амплитудочастотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик реального Г-образного фильтра бестрансформаторной СБЭП ПОС-1000 АЛТ.3.211.105 (НИИ автоматики и электромеханики, г. Томск) при варьировании параметров RL -нагрузки.

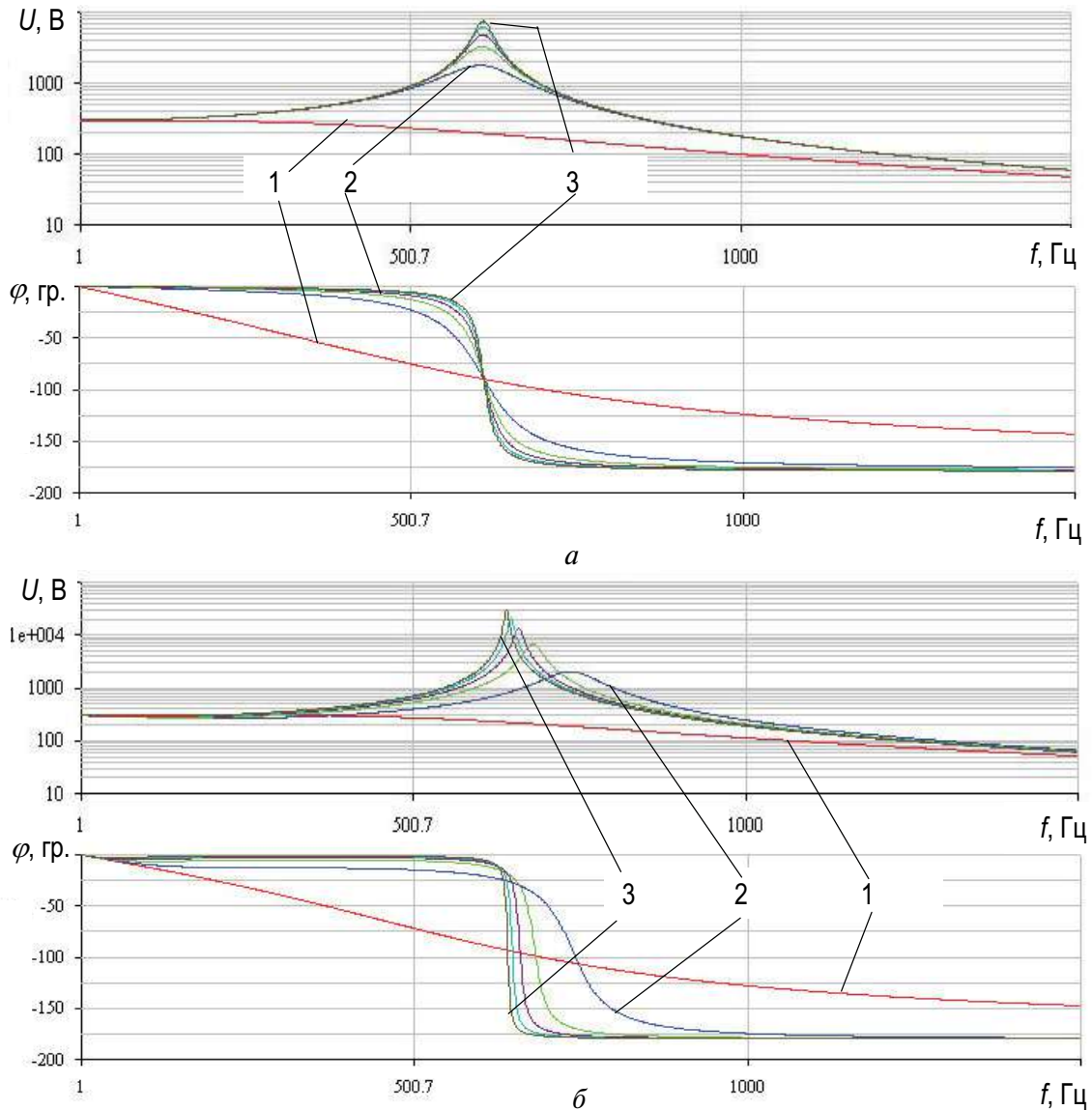


Рис. 3.15. АЧХ и ФЧХ Г-образного фильтра при $L = 0.01$ Гн; $C = 6,8$ мкФ:
а) активная нагрузка: 1 – 30 Ом; 2 – 230 Ом; 3 – холостой ход;
б) RL -нагрузка: 1 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,001$ Гн; 2 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,06$ Гн;
 3 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,1$ Гн

Рис. 3.16, *а, б* иллюстрирует АЧХ и ФЧХ двухконтурного полосового фильтра также при варьировании RL -нагрузки. Фильтрующие свойства данного фильтра (рис. 3.16) более подвержены влиянию изме-

нения со стороны нагрузки. При этом изменения АЧХ и ФЧХ при переменной по величине и характеру нагрузке способны привести к неустойчивой работе СБЭП.

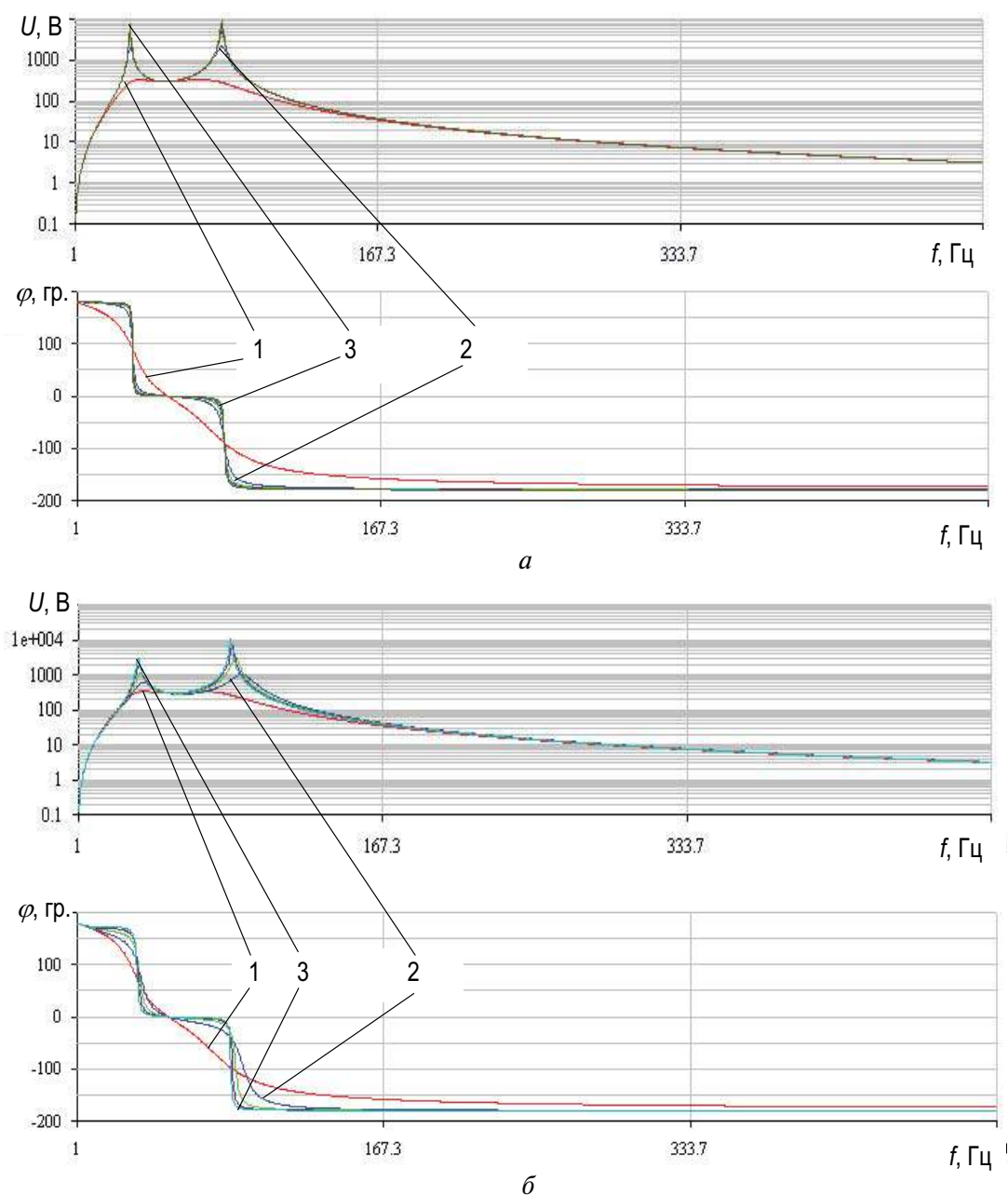


Рис. 3.16. АЧХ и ФЧХ полосового двухконтурного фильтра при $L_1, L_2 = 0,1$ Гн; $C_1, C_2 = 100$ мкФ: а) активная нагрузка: 1 – 30 Ом; 2 – 200 Ом; 3 – холостой ход; б) RL-нагрузка: 1 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,001$ Гн; 2 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,1$ Гн; 3 – $R_H = 30$ Ом, $L_H = 0,4$ Гн

Для согласования напряжения АБ или необходимости гальванической развязки АБ от потребителя энергетически более обоснованно включать дроссель Г-образного фильтра в первичную цепь низкого на-

пряжения, а конденсатор — во вторичную цепь высокого напряжения трансформатора (рис. 3.17).

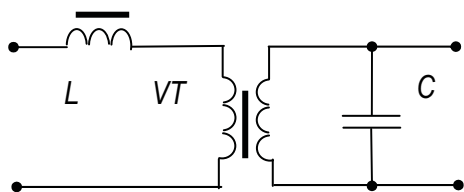


Рис. 3.17. LC-фильтр с развязывающим трансформатором

Характеристики АЧХ и ФЧХ такого фильтра при варьировании нагрузки представлены на рис. 3.18, а, б.

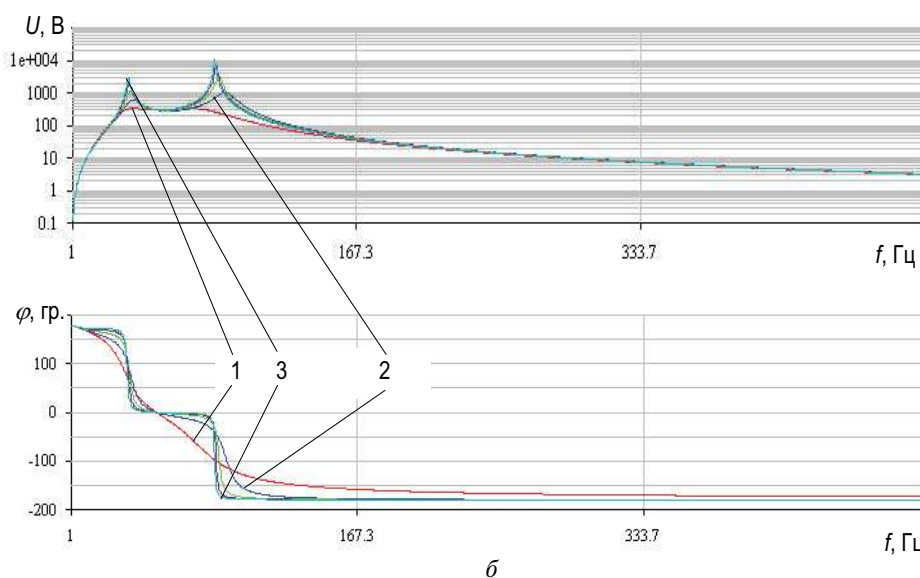
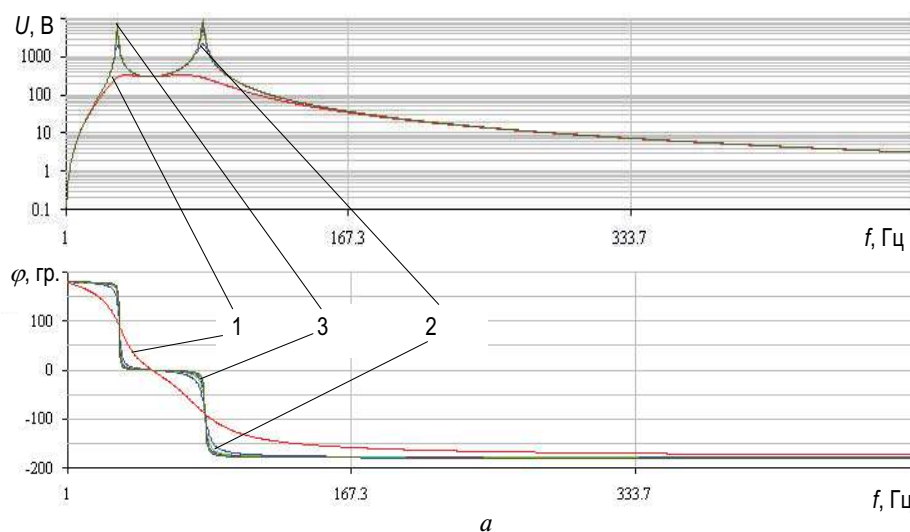


Рис. 3.18. АЧХ и ФЧХ Г-образного фильтра с согласующим трансформатором $P = 4 \text{ кВт}$, сталь Э41 при $L = 0,001 \text{ Гн}$; $C = 30 \text{ мкФ}$: а) активная нагрузка: 1 — 20 Ом ; 2 — 220 Ом ; 3 — холостой ход; б) RL-нагрузка: 1 — $R_{\text{н}} = 20 \text{ Ом}$, $L_{\text{н}} = 0,001 \text{ Гн}$; 2 — $R_{\text{н}} = 20 \text{ Ом}$, $L_{\text{н}} = 0,05 \text{ Гн}$; 3 — $R_{\text{н}} = 20 \text{ Ом}$, $L_{\text{н}} = 0,1 \text{ Гн}$

Проведем анализ работы, например, полосового фильтра (рис. 3.18, б) при входном напряжении (выходном напряжении АИН), сформированном методом ШИМ по синусоидальному закону. Представленный ниже анализ справедлив и для Г-образного фильтра при устремлении к бесконечно большому числу значений C_1 и L_2 , а также для любого вида модуляции — одно- или двухполярной, определяемой видом кусочно-постоянной функции $U_0 F(t)$ (см. выражение 3.21).

$$\begin{cases} L_1 \frac{di(t)}{dt} + R_1 i(t) + u_{\text{н}}(t) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i(t) dt = U_0 F(t) \\ C_2 \frac{du_{\text{н}}(t)}{dt} + i_{\text{н}}(t) - i(t) + \frac{1}{L_2} \int_0^t u_{\text{н}}(t) dt = 0 \\ L_{\text{н}} \frac{di_{\text{н}}(t)}{dt} - u_{\text{н}}(t) + R_{\text{н}} i_{\text{н}}(t) = 0 \end{cases}, \quad (3.22)$$

где $i(t)$ — входной ток фильтра; $R_1, R_{\text{н}}$ — соответственно, активные сопротивления входного дросселя L_1 и нагрузки; $i_{\text{н}}(t), u_{\text{н}}(t)$ — ток и напряжение нагрузки.

Обозначив в (3.22) $i_{\text{н}}(t) = z$; $u_{\text{н}}(t) = \frac{dy}{dt}$; $i(t) = \frac{dx}{dt}$, получим

$$\begin{cases} L_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + R_1 \frac{dx}{dt} + \frac{dy}{dt} + \frac{1}{C_1} x = U_0 F(t) \\ C_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + z - \frac{dx}{dt} + \frac{1}{L_2} y = 0 \\ L_{\text{н}} \frac{dz}{dt} - \frac{dy}{dt} + R_{\text{н}} z = 0 \end{cases}. \quad (3.23)$$

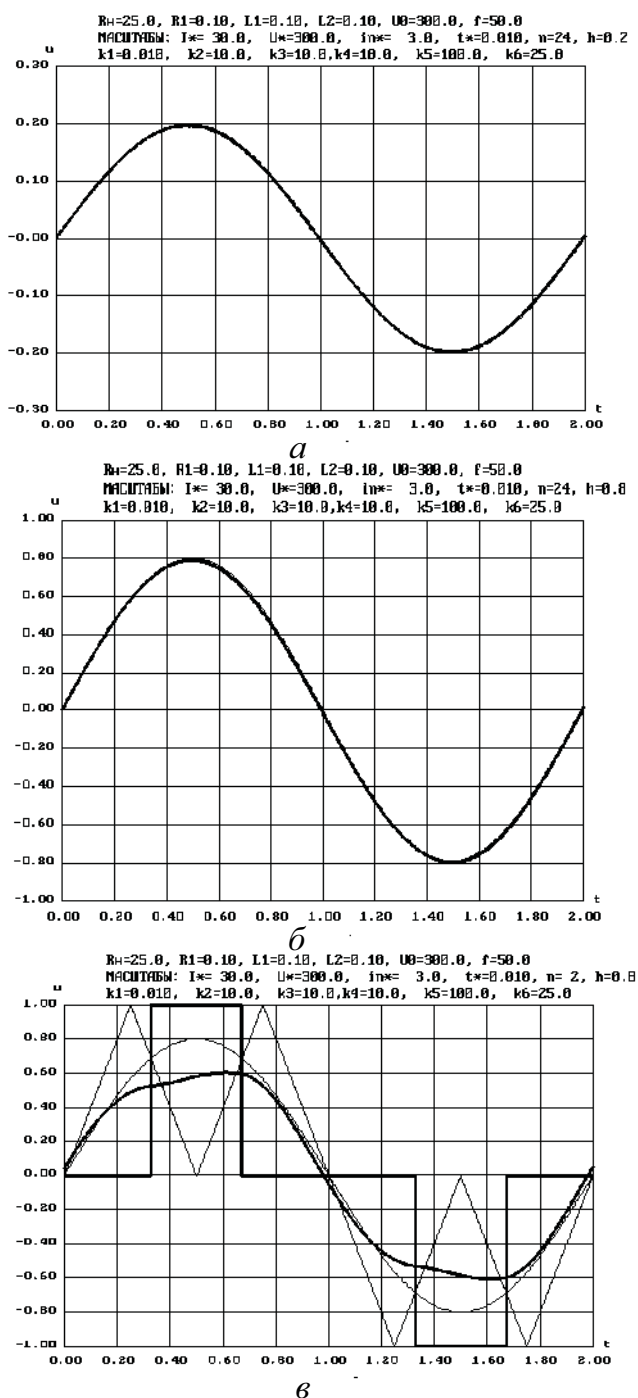
Вводя безразмерные величины:

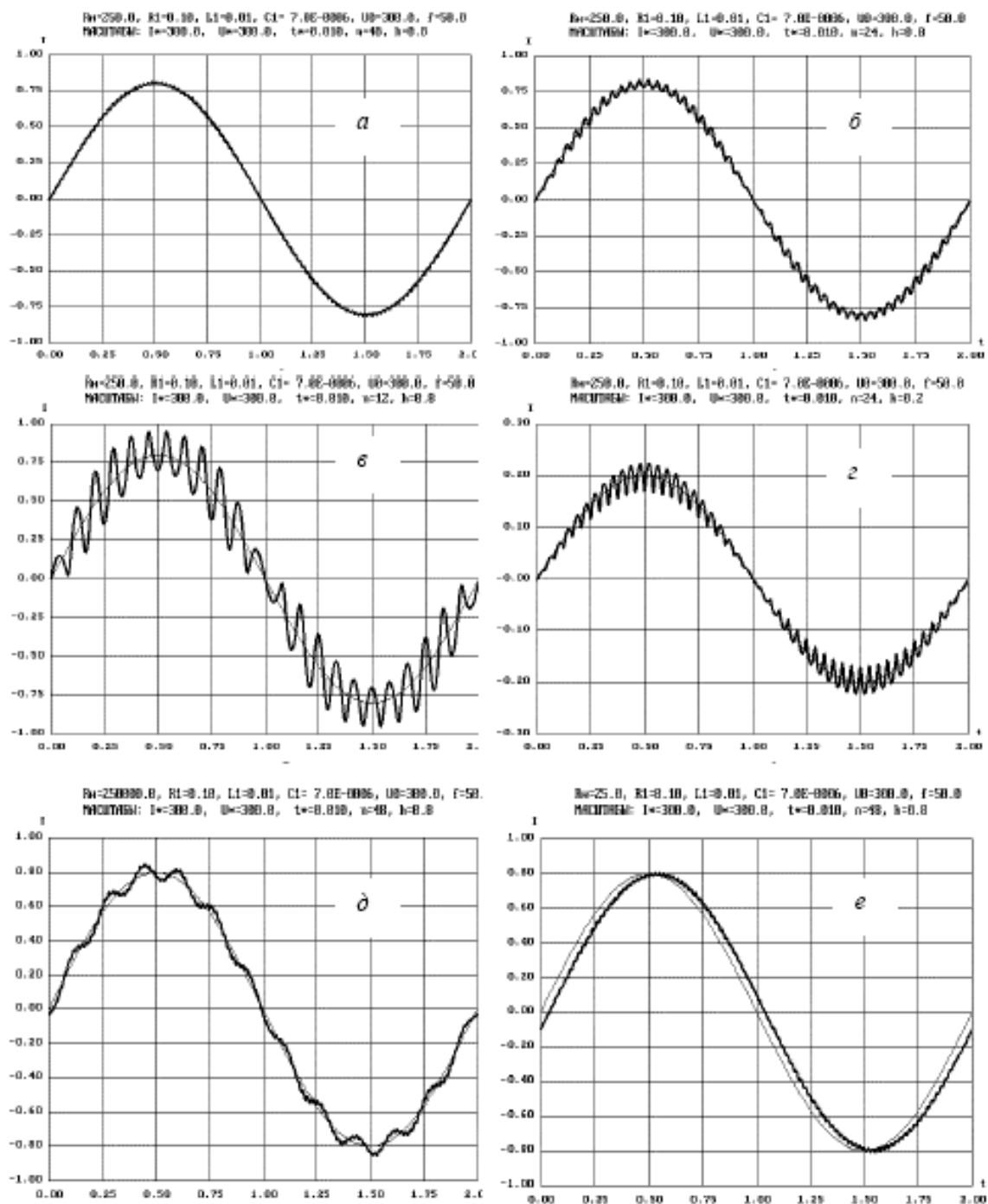
$$\begin{aligned} K_1 = \frac{R_1 t_*}{L_1}, K_2 = \frac{t_* x_*}{C_2 y_*}, K_3 = \frac{t_*^2}{C_2 L_2}, K_4 = \frac{t_*^2}{C_1 L_1}, K_5 = \frac{y_*}{L_{\text{н}} z_*}, K_6 = \frac{R_{\text{н}} t_*}{L_{\text{н}}}, \\ t_* = \frac{1}{2f_1}, z_* = \frac{C_2 y_*}{t_*^2}, x_* = \frac{U_0 t_*^2}{L_1}, y_* = U_0 t_*, \text{ при } \frac{U_0 t_*^2}{L_1 x_*} = 1, \frac{y_* t_*}{L_1 x_*} = 1, \end{aligned} \quad (3.24)$$

окончательно имеем

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{d\tau^2} + K_1 \frac{dx}{d\tau} + \frac{dy}{d\tau} + K_4 x = F(\tau) \\ \frac{d^2y}{d\tau^2} + z - K_2 \frac{dx}{d\tau} + K_3 y = 0 \\ \frac{dz}{d\tau} - K_5 \frac{dy}{d\tau} + K_6 z = 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

На рис. 3.19, *а–в* представлены результаты моделирования полосового фильтра СБЭП при однополярной модуляции по синусоидальному закону, согласно решению системы (3.22). Рис. 3.20, *а–е* иллюстрирует результаты моделирования Г-образного фильтра СБЭП при различных числах импульсов N на полупериоде и глубине регулирования. При Г-образном фильтре с трансформатором (см. рис. 3.17) в системе (3.22) R_1 и L_1 являются суммой первичных и приведенных вторичных значений активного и индуктивного сопротивлений рассеяния трансформатора.





Если до недавнего времени увеличение частоты опорного сигнала ограничивалось потерями на переключение ключей АИН, то в настоящее время данное ограничение практически снято. Современные IGBT-транзисторы (либо полевые) позволяют переключение на частотах десятки килогерц токов в сотни ампер. При этом Г-образный фильтр при приемлемых массогабаритных показателях способен обеспечить хорошую форму выходного напряжения.

Для однополярного напряжения минимальное значение коэффициента гармоник K_r получается при одном импульсе в течение половины периода основной частоты, расположенного симметрично относительно $\pi/2$. Однако распределение такого импульса на отдельные составляющие симметрично относительно $\pi/2$ дает возможность исключить некоторые гармоники из спектра и значительно сдвинуть низшую из высших гармоник в сторону высоких частот. Для однополярного напряжения максимальное количество исключаемых гармонических составляющих соответствует числу переключений за четверть периода основной частоты [56]. Однако это предельный случай селективного подавления гармонических составляющих при минимальном числе переключений и при некратных угловых координатах импульсов. В режиме синусоидальной модуляции число исключаемых гармоник определяется отношением несущей и модулирующей частот. То же относится и к «ступенчатому» синусу (см. рис. 3.13). Следовательно, при проектировании фильтра встает задача подавления наиболее низшей гармоники из высших.

Качество напряжения на выходе фильтра можно оценить коэффициентом гармоник на его выходе:

$$K_{Г\text{вых}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} Y_n^2 w_n^2}}{Y_1 w_1}, \quad (3.26)$$

где n, Y_n — соответственно, номер и амплитуда n -й гармоники; w_n — коэффициент передачи фильтра для n -й гармоники. Для Г-образного фильтра на холостом ходу $w_n = 1/(1 - n^2 \omega^2 LC)$.

При этом следует отметить, что оценка (3.26) справедлива для выходного напряжения фильтра именно при наличии в нем коэффициента передачи w_n . Подобная же оценка входного напряжения фильтра не совсем корректна, поскольку два различных напряжения могут иметь различный спектральный состав, но одинаковые амплитуды учитываемых гармоник. Из (3.26) можно предположить, что для такого случая затраты на подавление высших гармоник будут меньше в том фильтре,

на вход которого подано напряжение, имеющее более высокочастотные учитываемые гармонические составляющие. В подобных случаях для сравнения напряжений в [44] предложено использовать коэффициент режекции $K_n = n^2 Y_1 / Y_n$.

Напряжение n -й гармоники для задающего напряжения в виде «ступенчатого» синуса можно определить по выражению [40]:

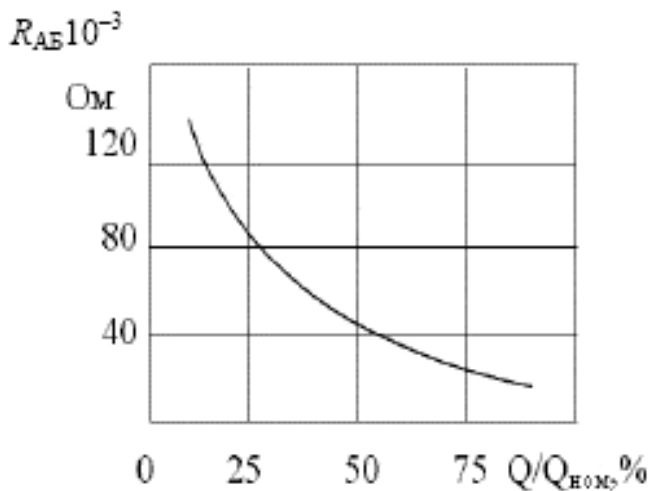
$$Y_n = \frac{4}{\pi n} \sum_{i=1}^s \sin(k_p n \Delta x_i) \sin n \beta_i, \quad (3.27)$$

где $s = 1, 2, 3 \dots$ — число импульсов на интервале $0 \dots \pi/2$; Δx_i — максимальная длительность импульса:

$$\Delta x_i = \frac{\frac{\beta_1}{4} \sin \beta_i}{\cos^2 \frac{\beta_1}{2}} \cos \frac{\beta_1}{4} [1 + (-1)^s], \quad (3.28)$$

где $\beta_1 = \pi / (s+1)$; $\beta_i = i\pi / (s+1) = i\beta_1$ — соответственно, координаты центров первого и i -го импульсов.

Особенность работы АИН в СБЭП состоит в том, что в цепи постоянного тока присутствует АБ, которой свойственно изменение активной проводимости и так называемой «фарадеевской емкости» [69] в зависимости от степени заряженности. Данная емкость в совокупности с активным и индуктивным сопротивлениями может быть неэффективной для сглаживания пульсаций, и этот факт объясняет необходимость использования компенсирующего конденсатора не только как приемника реактивной энергии, но и как элемента фильтрации для снижения пульсаций. На рис. 3.21 представлена зависимость полного



активного сопротивления щелочной никель-кадмиевой АБ типа 9НКЛБ-70, состоящей из 6 батарей по 9 аккумуляторов, используемых в СБЭП, от степени заряженности $Q/Q_{ном}$.

Рис. 3.21. Зависимость активного сопротивления АБ типа 9НКЛБ-70 (6 шт.) от степени заряженности

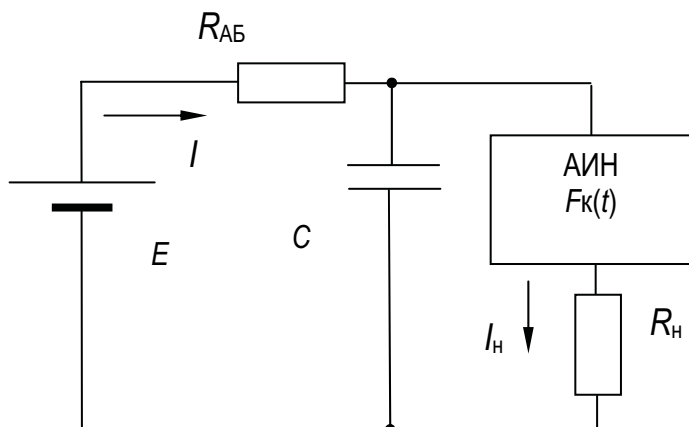


Рис. 3.22. Эквивалентная схема силовой части СБЭП для анализа пульсаций напряжения

Дополнительной особенностью является нелинейность внешней характеристики АБ $U_{AB} = F(I_{AB})$, т. е. наличие переменного внутреннего дифференциального сопротивления, а также зависимость этого сопротивления от силы тока АБ.

Предположим, что выходной фильтр АИН СБЭП спроектирован таким образом, что компенсирует индуктивную составляющую нагрузки. Тогда при активном токе АИН для цепи, изображенной на рис. 3.22, справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} E = IR_{AB} + U_c \\ I_H = \frac{U_c}{R_H} F_K(t) \\ I = I_H + C \frac{dU_c}{dt} \end{cases}, \quad (3.29)$$

где U_c — напряжение на компенсирующем конденсаторе; $F_K(t)$ — коммутационная функция АИН, сформированная по закону ШИМ.

Переходя к безразмерным величинам,

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{U_* \omega}{\pi} \frac{dU_c}{d\tau}, \quad \omega t = \pi \tau, \quad Ek_1 = U_*, \quad k_1 = \frac{1}{2fR_{AB}C},$$

$$k_2 = \frac{R_{AB}}{R_H}, \quad 0 \leq \tau \leq 1, \quad U_c = U_* u,$$

из (3.29) получим

$$\frac{du}{d\tau} + k_1 [1 + k_2 F_K(\tau)] u = k_1. \quad (3.30)$$

На рис. 3.23, 3.24 представлено в относительных единицах напряжение пульсаций на компенсирующем конденсаторе согласно решению уравнения (3.30) при различных сопротивлениях АБ, емкостях компенсирующего конденсатора и числе N импульсов на полупериоде.

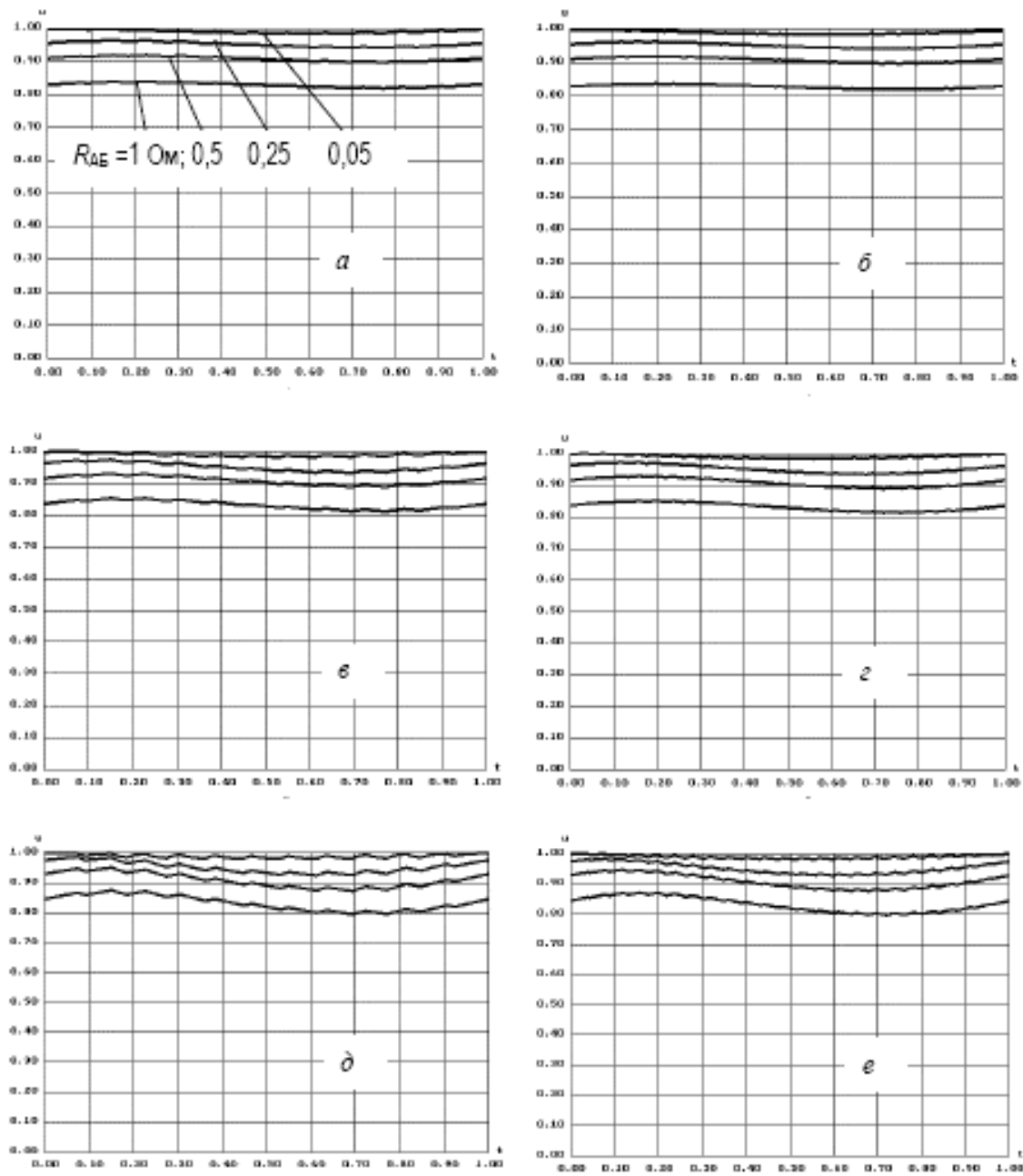


Рис. 3.23. Пульсации напряжения на компенсирующем конденсаторе при $k_p = 0,8$; $R_H = 2,5 \text{ Ом}$: а) $N = 12$; $C = 20 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$; б) $N = 24$; $C = 20 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$; в) $N = 12$; $C = 10^4 \text{ мкФ}$; г) $N = 24$; $C = 10^4 \text{ мкФ}$; д) $N = 12$; $C = 5 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$; е) $N = 24$; $C = 5 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$

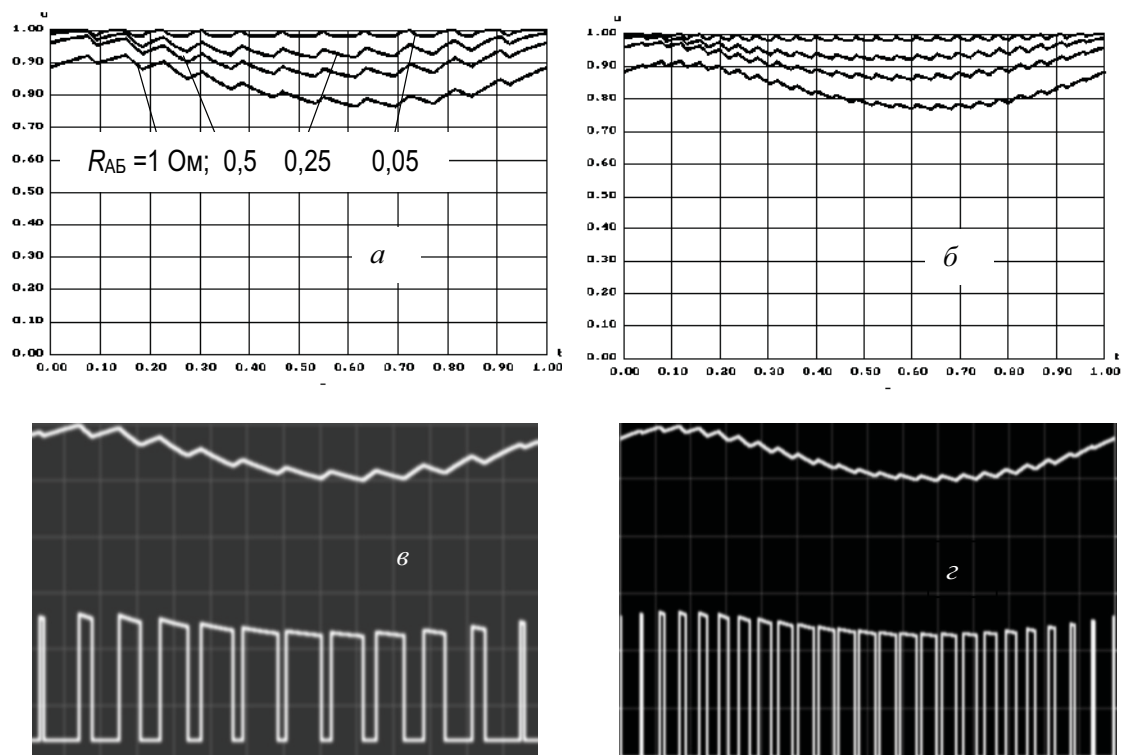


Рис. 3.24. Пульсации напряжения на компенсирующем конденсаторе при $k_p = 0,8$; $R_H = 2,5 \text{ Ом}$: а) $N = 12$; $C = 2 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$; б) $N = 24$; $C = 2 \cdot 10^3 \text{ мкФ}$; в) эксперимент для расчета, при $R_{AB} = 1 \text{ Ом}$; г) эксперимент для расчета, при $R_{AB} = 1 \text{ Ом}$

Как следует из расчетов и физических представлений, огибающая напряжения на компенсирующем конденсаторе математически представляет собой сумму экспоненты и синуса. Вид этой кривой зависит от постоянных времени, определяющих разряд емкости на сопротивление нагрузки во время токопотребления и ее заряд от АБ во время паузы. При преобладании паузы в начале полупериода напряжение практически остается неизменным. Однако, далее, за время паузы АБ не успевает восстановить потраченную во время импульса энергию конденсатора. Вследствие этого огибающая не симметрична относительно значения $\pi/2$ и вносит дополнительные низкочастотные искажения в напряжение, поступающее на вход фильтра АИН. При этом важно, чтобы АЧХ фильтра не имела резонанса в области вносимых низкочастотных гармоник.

С учетом влияния цепи элементов постоянного тока АИН («нежесткости» первичного источника) амплитуду n -й гармоники выходного напряжения можно представить в следующем виде:

$$Y_n = \frac{4U_{ci}[F_k(t), C, R_n, R_{AB}]}{\pi n} \sum_{i=1}^s \sin(k_p n \Delta x_i) \sin n \beta_i, \quad (3.31)$$

где $U_{ci}[F_k(t), C, R_n, R_{AB}]$ — значения численного решения (3.30) в точке координаты i -го импульса.

На рис. 3.25, 3.26 представлены зависимости коэффициента гармоник выходного напряжения от параметров R_{AB} , C и количества импульсов N .

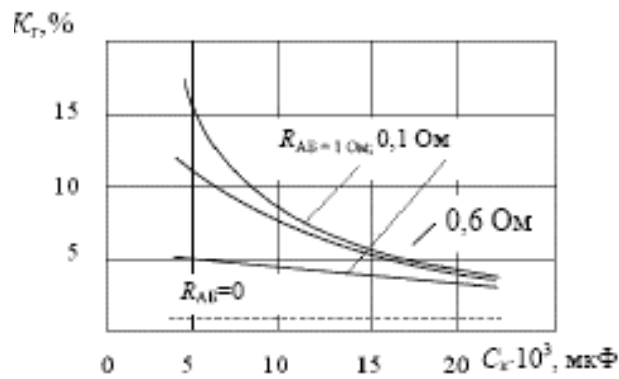


Рис. 3.25. Зависимость коэффициента гармоник выходного напряжения от емкости компенсирующего конденсатора (Г-обр. фильтр СБЭП)

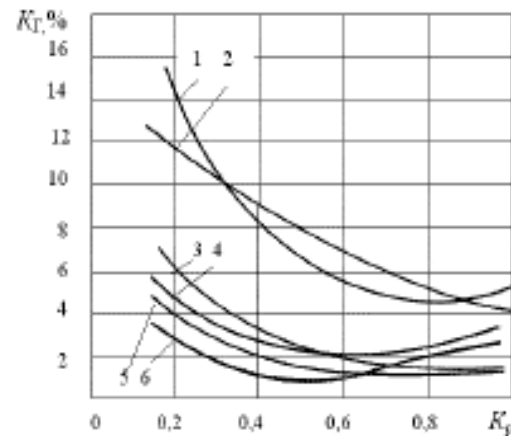


Рис. 3.26. Зависимость коэффициента гармоник от глубины регулирования:
1) $N = 24$; хол. ход;
2) $N = 24$; ном. нагр.; 3) $N = 48$; хол. ход;
4) $N = 48$; ном. нагр.; 5) $N = 96$; хол. ход;
6) $N = 96$; ном. нагр. ($R_{AB} = 0,1 \text{ Ом}$)

Как показывают анализ (3.31) и экспериментальные данные, нежесткость первичного источника может вносить ощутимые искажения в выходное напряжение АИН, особенно в СБЭП с низким напряжением АБ и с АБ щелочного типа, имеющих при прочих равных условиях внутреннее сопротивление, большее, чем у свинцово-кислотных батарей.

Вид расчетных кривых выходного напряжения СБЭП с однополярной ШИМ и Г-образным выходным фильтром при различных числах N и переменной глубине регулирования представлен на рис. 3.27, а–е. Наихудшим по гармоническому составу является напряжение при холостом ходе СБЭП.

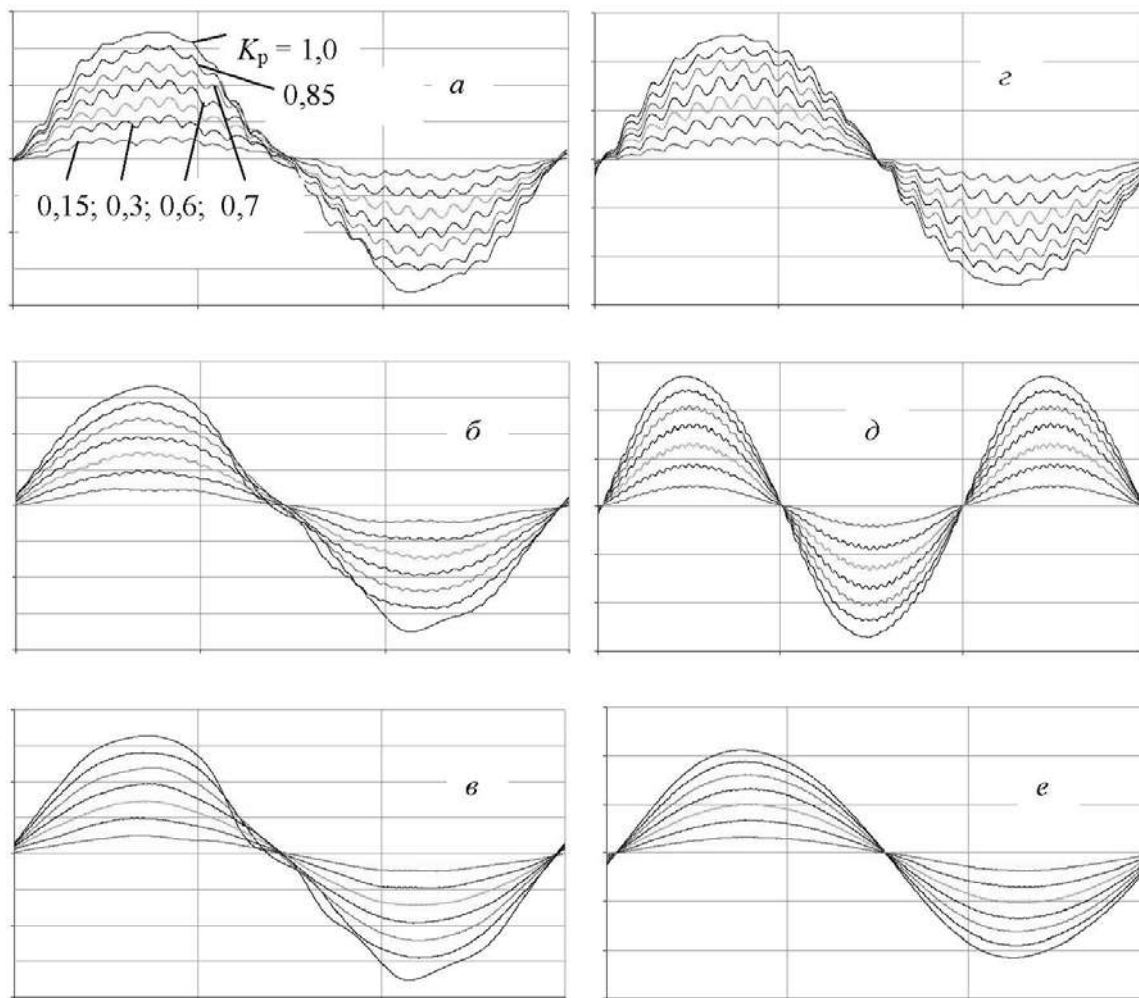


Рис. 3.27. Изменение выходного напряжения СБЭП с Γ -образным фильтром при регулировании: а–в – холостой ход при $N = 12; 24; 48$; г–е – номинальная нагрузка при $N = 12; 24; 48$

Ввиду неизбежного разряда АБ в СБЭП необходимо предусмотреть обратную связь по выходному напряжению. При этом диапазон изменения напряжения в щелочных АБ в инверторном режиме определяется изменением напряжения от буферного режима (1,5 В/элемент) до допустимого разрядного (1,0 В/элемент) и составляет 1,5. В свинцово-кислотных АБ этот диапазон уже и составляет величину около 1,3. Поскольку при снижении напряжения АБ за счет обратной связи возрастает коэффициент регулирования, это ведет к снижению коэффициента гармоник выходного напряжения. Однако при разряде возрастает внутреннее сопротивление АБ, приводящее к повышению этого коэффициента. В результате коэффициент гармоник остается приблизительно постоянным в диапазоне изменения напряжения АБ.

В зависимости от назначения СБЭП, при заданном коэффициенте гармоник фильтр рассчитывается либо по минимуму массогабаритной мощности, либо по максимальной жесткости его внешней характеристики (максимальному коэффициенту первой гармоники). Вторым критерий является более предпочтительным, так как связан с максимальным использованием энергии АБ. Методики такого проектирования изложены, в частности, в работах [46, 49, 51, 52, 66] и предусматривают некоторые конкретные нагрузки и режимы. В условиях же применения СБЭП, например для питания медицинской аппаратуры (см. гл. 1), характер нагрузки и ее диапазон может изменяться в широких пределах, поэтому сформулируем основные соображения по улучшению характеристик фильтра, обозначив тем самым направления действий разработчика.

Загрузку АИН фильтром можно уменьшить, используя индуктивность, параллельную нагрузке и настроенную в резонанс с выходным конденсатором. Однако эту меру можно предложить, когда нагрузка близка к активной. При этом в качестве индуктивности может выступать индуктивность ветви намагничивания специального трансформатора с зазором, а в качестве индуктивности последовательного дросселя индуктивность рассеяния первичной обмотки.

Конденсатор, включенный последовательно с дросселем, делает характеристику фильтра жесткой независимо от нагрузки. Однако такую меру можно предложить, если не важны габариты и стоимость фильтра. То же относится и к полосовому фильтру, масса и габариты которого в 1,5–2 раза оказываются выше обычного Г-образного. Режекторная схема фильтра несколько выигрывает в массе, однако усложняет сам фильтр и его настройку.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип формирования выходного напряжения АИН с широтно-импульсной модуляцией?
2. Приведите схемы однофазных и трехфазных АИН.
3. Какие типы алгоритмов ШИМ вы знаете?
4. Для чего применяются в АИН выходные фильтры напряжения?
5. Как на форму выходного напряжения АИН может влиять АБ в режиме потребления от нее энергии?

Глава 4. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

4.1. Общие сведения

Первичными источниками электроэнергии в СЭП, способных работать в автономном режиме, — системах бесперебойного и гарантированного электропитания ответственных электропотребителей — служат химические источники тока (ХИТ) — аккумуляторные батареи (АБ). Среди многообразия ХИТ в СБЭП и СГЭП переменного тока общепромышленного назначения в настоящее время наибольшее распространение получили щелочные никель-кадмиевые и свинцово-кислотные с рекомбинацией газа АБ [70]. При общей проблематике вопросов применения, в автономных системах электропитания применяются также никель-водородные и серебряно-цинковые аккумуляторы [68, 70].

В кислотных АБ для электрохимической реакции используется свинец, его оксид и серная кислота, в щелочных — никель, кадмий, серебро, цинк, железо, их оксиды (или гидроокиси) и гидроокись калия.

При проектировании СЭП разработчик должен руководствоваться в первую очередь следующими основными требованиями к АБ:

- энергетические показатели (коэффициент отдачи по емкости, удельная энергия, особенности зарядно-разрядных характеристик);
- время восстановления;
- экологическая чистота и пожаровзрывобезопасность;
- срок службы;
- саморазряд;
- стоимость;
- простота эксплуатации.

4.2. Кислотные аккумуляторы

Кислотные свинцовые АБ являются наиболее распространенными среди ХИТ большой емкости и мощности. Обладая сравнительно высокой удельной энергией в сочетании с надежностью и относительно низкой стоимостью, они находят широкое практическое применение.

В настоящее время свинцовые АБ можно условно разделить на две группы:

- 1) «классического» исполнения (со свободным электролитом);
- 2) с рекомбинацией газа (безуходные).

Первая группа наиболее значительна по распространенности и находит применение в системах электроснабжения транспорта в буферном включении с генераторами постоянного тока, в некоторых системах телефонной связи в «буфере» с управляемыми выпрямителями, в простейших устройствах аварийного электроснабжения бестеневых хирургических ламп в медицинских учреждениях. Главными достоинствами «классических» свинцовых АБ являются, пожалуй, возможность отдачи большой мгновенной мощности ввиду низкого выходного сопротивления и «жесткости» разрядной характеристики, возможность работы при низких температурах и низкая стоимость. Все остальные характеристики делают проблематичным их использование в СБЭП, особенно при размещении в непосредственной близости к пользователю.

Зависимость между емкостью, током и временем разряда свинцовой АБ выражается формулой Пейкерта [71], представляющей гиперболическую связь входящих в нее составляющих:

$$I^n t = C, \quad (4.1)$$

где I — разрядный ток; t — время разряда; C , n — постоянные.

Постоянная n характеризует конструкцию и технологию изготовления аккумулятора и не зависит от величины его емкости. Постоянная C зависит от размера аккумулятора. В зависимости от типа свинцовых АБ $n = 1, 2 \dots 1, 7$. Как правило, емкость Q «классических» свинцовых АБ дается изготовителем при 10-часовом разряде и токе, численно равном $0,1 Q$ ном. (20°C). Поэтому, учитывая зависимость (4.1), для обеспечения требуемого времени непрерывной работы СБЭП необходимо значительно завышать выбираемую АБ по емкости, что приводит к увеличению массогабаритных показателей и удорожанию системы. Заряд подобных АБ проходит с выделением водорода и сернистого ангидрида, переходящего на воздухе в кислотный туман, являющийся весьма опасным как для обслуживающего персонала, так и для аппаратуры. Кроме того, наличие трех критериев окончания заряда — резкий рост напряжения в конце, бурное газовыделение и изменение концентрации электролита — не позволяет корректно спроектировать автоматическое зарядное устройство АБ.

Саморазряд свинцовых аккумуляторов увеличивается в процессе эксплуатации и снижается с понижением температуры. Так, самораз-

ряд отечественных батарей в начале срока службы не превышает 30 % за 28 суток при температуре 25 °С. Как правило, свинцовая АБ выходит из строя после 100–200 полных зарядно-разрядных циклов. Температура окружающей среды ощутимо влияет на ход разрядной кривой. Снижение температуры приводит к снижению как ёмкости, так и разрядного напряжения. Следует добавить, что свинцовые АБ «боятся» глубоких разрядов, после которых батарею восстановить довольно сложно. В качестве подтверждения изложенного следует отметить, что подавляющее большинство из свыше 50 обследованных автором отечественных устройств аварийного электроснабжения бестеневых хирургических ламп в операционных Томской и Тюменской областей, использующих АБ типа СТ-60, СТ-75, по вышеназванным причинам оказались неработоспособны.

Вторая группа свинцовых АБ появилась как логическое развитие первой, на основе использования ряда технологических новшеств [72]. Это позволило, сохранив основное преимущество — дешевизну, придать батареям свойства, приблизившие их по характеристикам к щелочным АБ.

В подобных АБ активное вещество пластин и сплавы, используемые в производстве пластин, связывающее активное вещество, вступая в химическую реакцию, приводят так же, как в «классическом» аккумуляторе, к выделению кислорода на положительных пластинах. Внутреннее строение элемента таково, что позволяет этому кислороду в результате проникновения через сепаратор достигать отрицательных пластин. В результате химической реакции с пористым свинцом отрицательной пластины образуется оксид свинца. Серная кислота, находящаяся в составе электролита в виде гелеобразной массы, реагирует с этим оксидом свинца и образует сульфат и воду. Образованный таким способом сульфат свинца при электрохимическом воздействии распадается, и снова образуются свинец и серная кислота. Это равновесие вследствие цикла кислородной рекомбинации будет поддерживаться до тех пор, пока батарея находится в заряженном состоянии (рис. 4.1). АБ такого класса герметичны (имея предохранительный клапан) и экологически чисты.

Для осуществления такой химической реакции используются:

- пластины, состоящие из специального сплава, который придает им высокую механическую стойкость и способность выдерживать высокое давление;
- специальное соотношение количества активного вещества положительного и отрицательного электродов;

- фибровые сепараторы из боросиликатного стекла, имеющие хорошую стойкость к температуре и воздействию серной кислоты;
- высокая пористость сепараторов, позволяющая удерживать такое количество электролита, которое необходимо для работы элемента, не оставляя электролит свободным от химического воздействия;
- предохранительный клапан для аварийного выделения газов в случае чрезмерной перегрузки.

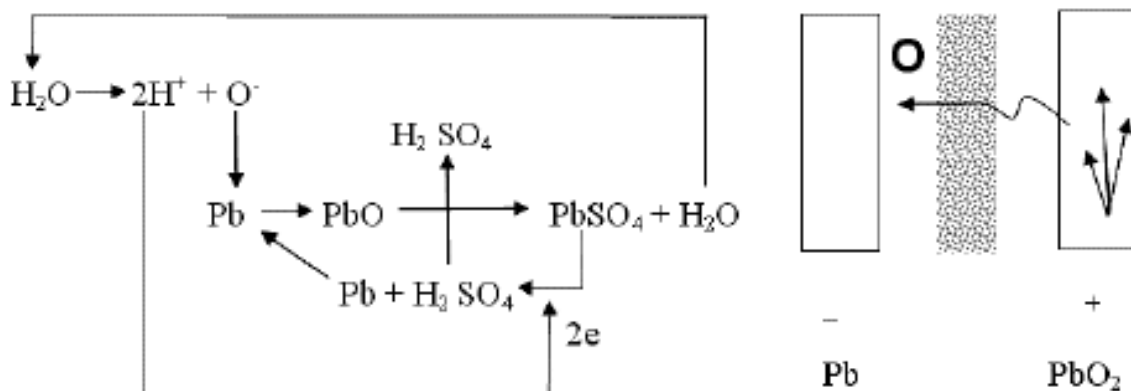


Рис. 4.1. Цикл кислородной рекомбинации в СКА

АБ с рекомбинацией газа более критичны к пульсациям зарядного тока и напряжения, чем батареи «классического» типа. Кроме того, для достижения оптимальных результатов рекомбинации рекомендуется корректировать величину зарядного напряжения в зависимости от окружающей температуры. Их саморазряд весьма невелик и составляет в месяц не более 3 % при температуре 20 °С. К глубокому разряду батареи менее критичны, однако это ведет к их преждевременному износу и значительному сокращению срока эксплуатации. Основной режим работы батарей — длительный буферный с управляемыми выпрямителями СБЭП.

Количество разрядных циклов аккумуляторов с рекомбинацией газа сильно зависит от процента их разряда. Так, если при 5%-м разряде количество циклов составляет ок. 1200, то при 30%-м разряде количество циклов составляет ок. 400. При 100%-м разряде количество циклов снижается до нескольких десятков, как у обычных свинцовых АБ. По данным ведущих зарубежных фирм «Sonnenschein», «Oldham France S.A.», срок службы АБ (АБ типа A500 Dryfit, Dryfit Longlife, Espace RG, HI, EG (OPzV)) составляет 5–10 лет. Среднее время восстановления кислотных АБ после полного разряда составляет около 24 часов.

4.3. Щелочные аккумуляторы

Серебряно-цинковые щелочные аккумуляторы приобрели известность благодаря высокой удельной энергии, в 3—4 раза превышающей удельную энергию лучших аккумуляторов других систем. В настоящее время эти аккумуляторы находят применение в радио- и телеаппаратуре, в аэрокосмической и военной технике. Серебряно-цинковые аккумуляторы характеризуются сочетанием высокой разрядной мощности с большой удельной энергией, достигающей при номинальном режиме 120...130 Вт ч/кг. Разрядные характеристики этих аккумуляторов отличаются стабильностью, если не считать начальный участок, который тем короче, чем выше разрядный ток. При этом возрастание тока мало влияет на ёмкость и разрядное напряжение в отличие от свинцовых батарей.

Рабочим интервалом температур серебряно-цинковых аккумуляторов считается диапазон +70...–20 °С. Повышение температуры несколько улучшает электрические характеристики, но заметно сокращает срок службы. Аккумуляторы обладают сравнительно низким саморазрядом, который не превышает 2...4 % в месяц.

Основные недостатки — малый ресурс в циклах (порядка 80...100), критичность перезаряда и высокая стоимость.

Щелочные никель-кадмиевые (НК) и никель-железные (НЖ) аккумуляторы имеют много общего в конструкции и характеристиках, хотя по отдельным показателям они несколько отличаются. Такие аккумуляторы имеют большой ресурс (до полутора тысяч зарядно-разрядных циклов). По распространенности эти аккумуляторы занимают второе место по сравнению со свинцовыми.

Ёмкость щелочных АБ, в отличие от кислотных, меньше зависит от величины разрядного тока. В основном это объясняется тем, что концентрация щелочи в процессе разряда остается примерно постоянной. В этом смысле упрощается и зарядное устройство, поскольку практически единственным критерием окончания заряда является резко повышающееся напряжение на зажимах АБ при постоянстве зарядного тока. К пульсациям зарядного тока или напряжения щелочные АБ менее критичны, чем кислотные АБ с рекомбинацией газа, а по удельной энергии приблизительно аналогичны кислотным.

НЖ-аккумуляторы много дешевле, чем НК, так как в них не используется дефицитный кадмий. Однако НЖ-аккумуляторы характеризуются повышенным саморазрядом и пониженной отдачей по току и энергии. Саморазряд НЖ-аккумуляторов при температуре 20 °С со-

ставляет до 50...80 % в месяц в зависимости от чистоты активной массы железного электрода и высок из-за сильного растворения железа. НК-аккумулятор обычно теряет в первый месяц хранения 10...15 % емкости. Первоначальный быстрый спад емкости связан с разложением высших оксидов никеля. После первого месяца хранения дальнейшая потеря емкости НК-аккумуляторов незначительна и составляет 2...3 %. У НЖ-аккумуляторов более высокое разрядное напряжение, а характеристики НК-аккумуляторов отличаются более высокой стабильностью, особенно при разряде малым током.

НК-аккумуляторы по сравнению с НЖ-аккумуляторами обладают лучшей работоспособностью в условиях повышенной токовой нагрузки и пониженной температуры.

В настоящее время выпускаются НК-АБ емкостью до 125 Ач. Фактический ресурс ламельных НК-АБ составляет 1000...2500 циклов, а срок службы не менее 8—12 лет. Следует отметить, что все эти цифры зависят от условий эксплуатации и от ухода за аккумуляторами.

В отличие от свинцовых, НК-АБ могут храниться длительное время без необратимых изменений как в заряженном, так и в полуразряженном состоянии; емкость, снижающаяся в результате хранения, может быть восстановлена проведением тренировочных зарядно-разрядных циклов; НК-АБ можно считать практически экологически чистыми, поскольку при хранении, разряде и заряде они не выделяют вредных для персонала веществ. Среднее время восстановления щелочных АБ после полного разряда меньше, чем у кислотных.

4.4. Пожаровзрывоопасность АБ

Пожаровзрывоопасность АБ обусловлена образованием и выделением водорода при их функционировании в системах электропитания или хранения.

Газовыделение в АБ происходит как в режиме заряда вследствие неполного использования зарядного тока (при электролизе воды), так и в режиме хранения вследствие взаимодействия активных масс с электролитом. В режиме разряда выделение водорода невозможно, исходя из природы физико-химических процессов, происходящих в АБ, если только речь не идет о коротком замыкании, способном привести к явлению «переполюсовки» отдельных элементов батареи и резкому образованию водорода в них.

В **никель-железных АБ** стационарный потенциал железного электрода в щелочи отрицательнее потенциала водорода в том же растворе

на 40...50 мВ. Следовательно, железный электрод способен к самопроизвольному растворению в щелочах с выделением водорода, что, в свою очередь, и обуславливает наблюдаемый на практике значительный саморазряд. Саморазряд химического источника тока (ХИТ) C в процентах за сутки оценивается по выражению [71]:

$$C_+ = \frac{V_0}{0,209QT} 100 \%, \quad (4.2)$$

где V_0 — объем выделившегося газа при нормальных условиях; 0,209 и 0,418 — объемы кислорода и водорода (л), выделившихся при саморазряде на положительном и отрицательном электродах, равном 1 Ач; Q — емкость ХИТ в начале хранения; T — продолжительность хранения в сутках.

Согласно выражениям (4.2) и данным о саморазряде НЖ-АБ, приведенным выше, можно определить количество водорода, выделяющегося при хранении батарей. Так, при хранении набора НЖ-АБ «60-вольтовой» СБЭП из шестидесяти элементов емкостью 80 Ач каждый при полном саморазряде за два месяца хранения выделится около 2000 л водорода при скорости выделения около 1380 см³/ч. И хотя для проветриваемых помещений эти величины не являются опасными, в тесном закрытом помещении такое хранение представляет потенциальную опасность.

Известно, что с учетом коэффициента отдачи по емкости (для НЖ-АБ порядка 60 %) щелочной батарее при заряде необходимо сообщить емкость, приблизительно в полтора раза большую, чем номинальная. Ввиду этого АБ затягивается в перезаряд, характеризующийся выделением водорода. При таком режиме заряда происходит электролиз воды с расходом около 0,3 см³ на 1 Ач перезаряда. За это время выделяется аналогичное по порядку количество водорода при исходных данных, приведенных выше для случая саморазряда [71].

В никель-кадмиевых АБ стационарный потенциал кадмиевого электрода в щелочах, наоборот, положительнее на 15...20 мВ равновесного потенциала водородного электрода в той же среде. Следовательно, кадмиевый электрод, в отличие от железного, не способен к самопроизвольному растворению в щелочи с выделением водорода, т. е. саморазряд НК-АБ с выделением водорода термодинамически невозможен.

Заряд НК-АБ протекает эффективно практически со 100%-м выходом по току. Только после сообщения кадмиевому электроду около 80 % зарядной емкости начинается побочная реакция выделения водорода.

Уменьшить газовыделение при заряде (и в буферном режиме) можно, например, ограничив конечное зарядное напряжение до значения, при котором выделение водорода практически исключается, а выделение кислорода на положительном электроде протекает с едва заметной скоростью. Такие условия в НК-АБ создаются при значении напряжения 1,5 В. Так, многолетние наблюдения автора за НК-АБ, работающими длительно в буферном режиме в составе многочисленных СБЭП «ПОС-2000М» в экстренных медицинских отделениях г. Томска и Томской области, показывают, что батарея, состоящая из 54 элементов, выделяет в сутки не более 1,5 см³ водорода. Учитывая, что для обычных помещений без специальной вентиляции и объемом не менее 25³ м допустимая скорость выделения водорода составляет не более 10 000 см³, применение НК-АБ в СБЭП представляется практически безопасным. Однако следует отметить, что в непосредственной близости от СБЭП нужно исключить проведение работ с открытым пламенем.

В кислотных АБ с рекомбинацией происходит рекомбинация 95–100 % водорода, что практически исключает его выделение в помещении. В подобных АБ имеется самозакрывающийся клапан, который предохраняет элемент от избыточного давления при перезаряде и защищает АБ от попадания воздуха внутрь элемента. По данным [73], АБ емкостью 120 Ач при температуре $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ выделяет за три месяца приблизительно 700 см³ водорода, при этом в нормальном режиме работы скорость выделения водорода составляет около 0,3 см³/ч при емкости одного элемента 100 Ач [73]. На практике скорость выделения водорода может быть выше, например при ускоренном режиме заряда или повышенной температуре.

В табл. 4.1 приведены скорости выделения водорода для герметичных свинцовых АБ с рекомбинацией газа, используемых в СБЭП и для питания другой аппаратуры.

Таблица 4.1

Тип элемента	Скорость выделения водорода, см ³ /ч на элемент					
	Режим мин. выделения	Режим максимального выделения				
	200 Ач/эл.	50 Ач/эл.	100 Ач/эл.	200 Ач/эл.	500 Ач/эл.	1000 Ач/эл.
RG	0,6	1,5	3,0	6,0	15	—
HI	0,6	1,5	3,0	6,0	15	—
EG	0,6	—	—	6,0	15	30

Основным способом обеспечения пожарной безопасности АБ является удаление водорода с помощью вентиляции.

Расход воздуха, необходимый для обеспечения пожарной безопасности, определяется согласно СНиП 2.04.05-91 (прил. 17) [74] по формуле

$$L = L_{W,Z} + \frac{m_{\text{по}} - L_{W,Z}(q_{W,Z} - q_{IN})}{q_g - q_L}, \quad (4.3)$$

где $L_{W,Z}$ — расход воздуха, удаляемого из рабочей зоны системой местных отсосов; $m_{\text{по}}$ — расход пожаровзрывоопасного вещества, поступающего в воздух помещения; для СБЭП, содержащей n АБ, скорость выделения у которых W , $m_{\text{по}} = nW$; $q_{W,Z}$ — концентрация пожаровзрывоопасного вещества в воздухе, удаляемом из помещения; q_L — предельно допустимая концентрация вещества в воздухе, удаляемая из рабочей зоны; q_{IN} — концентрация пожаровзрывоопасного вещества в воздухе, подаваемом в помещение; q_g — нижний концентрационный предел распространения пламени горючих газов (НКПР).

Для водорода $q_g = 4 \%$ (об.) [74]. Учитывая, что, согласно СНиП 2.04.05-91 (п. 4.21), концентрация горючих газов в помещении не должна превышать 0,1 от НКПР, и считая, что принудительная вентиляция отсутствует, имеем

$$q_L = 0,1q_g = 0,4 \% \text{ (об.)}, L_{W,Z} = 0, q_{IN} = 0 \text{ (об.)}, \quad (4.4)$$

и выражение (4.3) приобретает вид

$$L = \frac{nW100}{0,4} = 250nW. \quad (4.5)$$

В табл. 4.2 приведены требуемые величины производительности воздухообмена в помещении в расчете на один аккумуляторный элемент.

Таблица 4.2

Тип элемента	Требуемая производительность вентиляции, $\text{м}^3 10^{-3}/\text{ч}$					
	Режим мин. выделения	Режим максимального выделения				
	200 Ач/эл.	50 Ач/эл.	100 Ач/эл.	200 Ач/эл.	500 Ач/эл.	1000 Ач/эл.
RG	0,15	0,375	0,75	1,5	3,75	—
HI	0,15	0,375	0,75	1,5	3,75	—
EG	0,15	—	0,75	1,5	3,75	7,5

Следует отметить, что приведенная в табл. 4.2 производительность воздухообмена обеспечивается естественной вентиляцией помещения. Ввиду своей легкости водород быстро рассеивается в окружающей атмосфере, чему способствует и свободная циркуляция воздуха около АБ СБЭП. Данные ВНИИ пожарной обороны показывают, что концентрация водорода однородна по высоте помещения в области, расположенной выше источника его поступления, и локальные взрывоопасные объемы образовываться не будут при наличии воздухообмена с производительностью не ниже указанной в табл. 4.2.

Аккумуляторный отсек СБЭП (если он существует) должен обеспечивать свободную циркуляцию для возможных газовыделений и окружающего воздуха. Объем V (м³/ч) циркулирующего воздуха определяется соотношением:

$$V = 0,05nI_c, \quad (4.6)$$

где 0,05 – константа, сформированная из трех составляющих: фактора изменения электролита; объема циркулирующего воздуха на основании силы тока и времени для электролиза; фактора безопасности; $I_c = 0,25I(A)$; 0,25 – корректирующий фактор для герметичных АБ; $I(A)$ – определяется как 1 А на 100 Ач.

В этом случае размер A вентиляционного отверстия в аккумуляторном отсеке СБЭП (см²) определяется из условия [75]

$$A \geq 2,8 V, \quad (4.7)$$

при скорости перемещения воздуха не менее 0,1 м/с.

Если свободный объем воздуха V_o (см³) в аккумуляторном отсеке СБЭП определить как

$$V_o = V_{AB} - V_{об}, \quad (4.8)$$

где V_{AB} – объем АБ; $V_{об}$ – объем кабелей и дополнительного оборудования, то для целей конструирования аккумуляторного отсека СБЭП можно использовать следующие условия:

- при $V_{AB} > 2,5V$ достаточно односторонней вентиляции отсека;
- при $V_{AB} \leq 2,5V$ необходима двухсторонняя естественная вентиляция отсека при расположении вентиляционных отверстий снизу и сверху.

При отсутствии внешней естественной вентиляции помещение с АБ необходимо периодически проветривать. Поскольку при любых условиях концентрация водорода в помещении не должна превышать значения 0,1 от НКПР ($q_L = 0,4$ % об., см. выше) [76], то указанная концентрация C будет достигнута через время t :

$$t = \frac{CV_{\text{пом}}}{100W_{\text{полн}}}, \quad (4.9)$$

где $V_{\text{пом}}$ — объем помещения, м³; $W_{\text{полн}}$ — суммарная скорость выделения водорода всеми АБ, м³/ч.

Как показывает расчет по выражению (9), для помещений объемом 25 м³, даже при скорости выделения водорода 10⁴ см³/ч (что для СБЭП практически нереально), максимальная концентрация водорода будет достигнута через 10 ч. В этом случае необходимое проветривание может быть достигнуто лишь периодическим открыванием дверей. По данным [73], максимально возможное количество АБ, при котором выделение водорода не будет превышать значения 10⁴ см³/ч, для серий RG, HI и EG емкостью 50 Ач составляет 666 шт.(!), 100 Ач — 333 шт. и т. д.

Таким образом, при соблюдении условий заряда и работы в «буферном» режиме, не приводящих к критическим концентрациям и скорости выделения водорода в АБ, эксплуатация СБЭП с НК-батареями и батареями с рекомбинацией газа в помещениях с естественной и принудительной вентиляцией не представляет пожарной опасности. Исходя из реально малой скорости выделения водорода в данных АБ, его удаление можно производить путем периодического проветривания помещений согласно формуле (4.9).

4.5. Методы заряда аккумуляторных батарей

4.5.1. Методы заряда свинцово-кислотных аккумуляторов с циклом кислородной рекомбинации

Метод «ток-напряжение» предполагает заряд в две ступени (рис. 4.2):

1. Первая ступень — заряд стабилизированным током (рекомендуемые пределы — ток заряда, численно равный (0,05–0,25) C_{10} , где C_{10} — емкость десятичасового разряда АБ). Напряжение при этом возрастает. При достижении величины 2,35–2,45 В/элемент. (рекомендации фирм-производителей по вольтам несколько различаются) переходят ко второй ступени заряда.

2. Вторая ступень — заряд стабилизированным на-

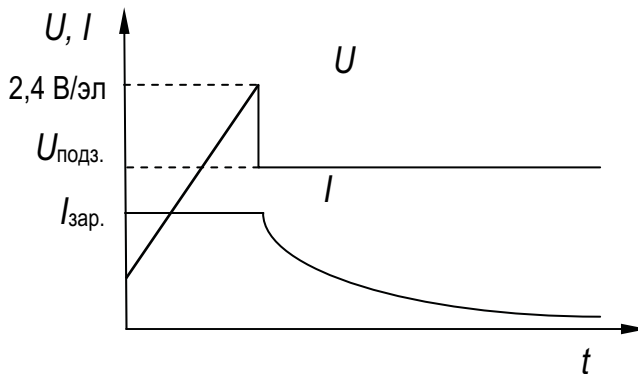


Рис. 4.2. Заряд методом «ток—напряжение»

пряжением 2,3 В/элемент. при точности стабилизации $\pm 1\%$ и температуре $T = 20^\circ\text{C}$. Зарядный ток при этом уменьшается.

Метод «напряжение» является частным случаем предыдущего метода. Напряжение на выходе зарядного устройства устанавливается 2,3 В/элемент.

при точности стабилизации $\pm 1\%$ и температуре $T = 20^\circ\text{C}$. После подключения зарядного устройства к АБ напряжение и ток изменяются в соответствии с графиками, рис. 4.3.

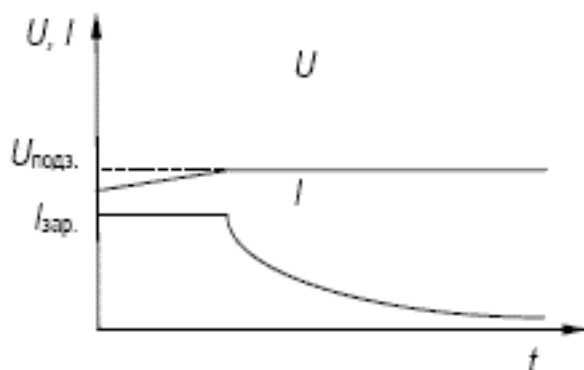


Рис. 4.3. Заряд методом «напряжение»

Метод «ток—напряжение—ток». Согласно этому методу заряд сначала проводится постоянным током I_1 , превышающим в 1,7–3,4 раза ток I_{20} двадцатичасового разряда АБ. Далее заряд продолжается постоянным напряжением при значении 2,3 В/элемент. После снижения тока до определенного значения (ок. $I_2 = 0,136 I_{20}$) заряд продолжается этим током, пока напряжение не достигнет 2,35...2,4 В/элемент. (рис. 4.4). АБ считаются полностью заряженными, если остаточный зарядный ток в течение 2 часов больше не изменяется. При этом остаточный зарядный ток должен составлять величину 1...3 мА на каждый Ач для блочных АБ и ок. 80 мА на каждые 100 Ач для 2-вольтовых элементов.

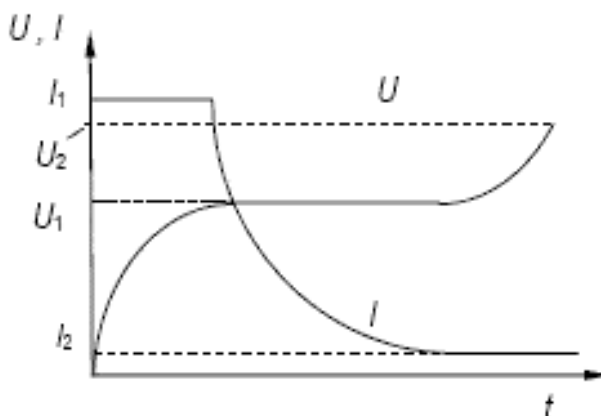


Рис. 4.4. Заряд методом «ток—напряжение—ток»

Быстрый заряд АБ. Для быстрого заряда АБ применяются более высокие, чем обычно, значения токов заряда и напряжения. Ток заряда может быть установлен до величины, численно равной $1,5C_{10}$. При этом разряженная АБ заряжается за 1,5 часа до приблизительно 70 % номинальной емкости. В случае, если емкость АБ выше 10 Ач, необходимо ограничить ток заряда на начальном этапе до величины, численно равной ок. C_{10} , чтобы избежать повышения температуры в процессе заряда.

4.5.2. Методы заряда никель-кадмиевых аккумуляторов

Для НК-аккумуляторов, как правило, используют два метода заряда — заряд при постоянном токе и заряд при постоянном напряжении. Процесс заряда при постоянном токе происходит аналогично заряду свинцово-кислотной АБ при другом ограничении напряжения переключения на постоянное значение. Для НК-аккумуляторов это значение составляет 1,6 В/элемент.

Заряд при постоянном напряжении характеризуется сообщением АБ наибольшей части зарядной емкости в начале заряда. Однако при этом развивается большое значение тока.

С целью минимизации газовыделения в АБ щелочного типа может быть применен специальный режим заряда. На первом этапе АБ работает со стабилизацией зарядного тока повышенного значения, численно равного $1/8 Q_n$. При этом с отсутствием газовыделения обеспечивается приемлемый тепловой режим АБ. Второй этап начинается после достижения батареей напряжения 1,6 В/элемент. и характеризуется переключением на малый ток заряда при его стабилизации. При этом напряжение на АБ понижено, но оказывается выше буферного значения 1,5 В/элемент. Происходит дальнейший заряд, который опять завершается при достижении АБ значения 1,6 В/элемент. Если АБ не зарядилась до некоторого значения, определенного уставками напряжений, то она вновь переключается на повышенное напряжение. При этом в определенные промежутки времени от АБ «источником питания собственных нужд» потребляется небольшой разрядный ток. По мере заряда на пониженном токе время достижения АБ верхнего уровня 1,6 В/элемент. будет уменьшаться и АБ все чаще будет переключаться с высокого уровня напряжения на низкий с небольшими перерывами токопотребления. После некоторого количества циклов, определяемого состоянием АБ, она переходит в буферный режим стабилизации напряжения при значении 1,5 В/элемент., при котором согласно законам электрохимии, термодинамически процесс газовыделения прекращается. Таким образом, в зарядном устройстве СБЭП осуществляется обратная связь по степени заряженности АБ.

4.6. Природа полного внутреннего сопротивления и математическое представление АБ

Полное внутреннее сопротивление АБ переменному току в общем случае включает в себя омическую, емкостную и индуктивную составляющие.

Емкостная составляющая полного сопротивления обусловлена несколькими факторами [69]. Во-первых, поскольку причиной прохождения электрического тока через границу электрод–электролит является электрохимическая окислительно-восстановительная реакция («фарадеевский процесс»), можно говорить и о «фарадеевской» емкости. Однако даже если электролит не содержит химически активных частиц, т. е. представляет собой чистый фон, и электрохимическая реакция не происходит, переменный ток через границу электрод–электролит все равно проходит за счет изменения заряда молекулярного конденсатора – двойного слоя (ток заряжения двойного слоя), и следовательно, во-вторых, этому процессу соответствует еще одна составляющая емкости. Реально в этих составляющих электрохимического процесса участвуют одни и те же частицы, и по существу разделить указанные емкости сложно. Поэтому назовем эти составляющие одним термином «емкость двойного слоя». В схеме замещения (рис. 4.5) электрода емкость двойного слоя $C_{дс}$ включается параллельно с активным сопротивлением электрохимической реакции R_{ϕ} , отражающим прохождение фарадеевского тока через границу раздела электрод–электролит. Как показывают исследования, емкость двойного слоя не зависит от частоты (примерно до частоты 10 мГц). При расчете плотности истинной поверхности значение емкости двойного слоя обычно составляет 0,1...0,4 Ф/м² [77].

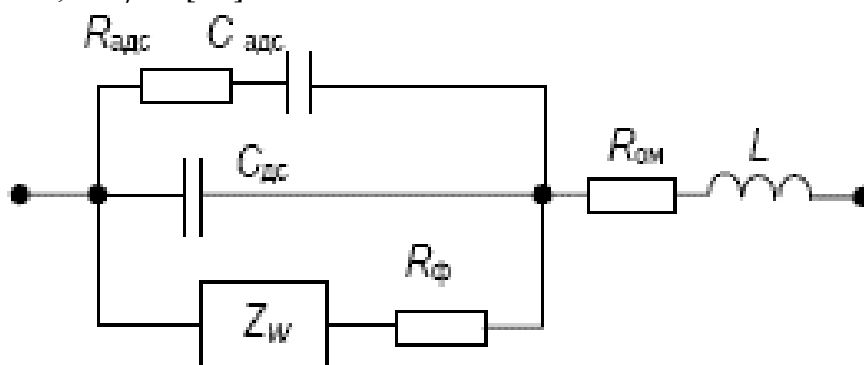


Рис. 4.5. Электрическая эквивалентная схема замещения электродных процессов в АБ

Иногда емкость двойного слоя намного превосходит указанные значения, достигая 4...10 Ф/м². Это связано с процессами электрохимической адсорбции кислорода или водорода. Адсорбционная составляющая $C_{адс}$ («адсорбционная псевдоемкость») включается параллельно «основной» емкости двойного слоя, а замедленность адсорбционных процессов отображается последовательно включенным активным со-

противлением $R_{\text{адс}}$. Постоянная времени $\tau_{\text{адс}} = R_{\text{адс}} \cdot C_{\text{адс}}$ адсорбционных процессов может изменяться до десятков секунд.

Еще одной причиной возникновения емкостного сопротивления является замедленность диффузионных процессов. При отсутствии тока через границу электрод–электролит концентрация электролита и его компонентов в приэлектродном слое одинакова. При включении постоянного тока концентрация компонентов начинает изменяться, и ее распределение в приэлектродном становится неравномерным. Время установления стационарного распределения концентраций (переходное время $\tau_{\text{диф}}$ диффузионного процесса) определяется коэффициентом диффузии D и толщиной слоя δ , в котором происходит изменение концентрации, причем $\tau_{\text{диф}} \approx \delta^2 / D$ [77].

В АБ со свободным жидким электролитом концентрационные изменения происходят в тонком диффузионном слое электролита около поверхности электрода. Толщина этого слоя зависит от скорости движения жидкости и обычно составляет $10^{-5} \dots 10^{-4}$ м. Поскольку коэффициенты диффузии большинства веществ в водных растворах равны приблизительно 10^{-9} м/с², то переходное время диффузионного процесса составляет примерно 1 с. При желеобразных и твердых электролитах это время увеличивается до сотен секунд.

При прохождении переменного тока через электродную систему АБ распределение концентраций имеет периодический характер, образуя концентрационную волну. Математически этот процесс описывается полным сопротивлением Варбурга, состоящим из последовательно соединенных сопротивлений R_W и C_W , зависящих от частоты ω :

$$R_W = A_W / \sqrt{\omega}, \quad C_W = 1 / A_W \sqrt{\omega}, \quad (4.10)$$

где A_W — постоянная Варбурга.

В схеме замещения полное сопротивление Варбурга Z_W включено последовательно с сопротивлением электрохимической реакции $R_{\text{ф}}$.

Омическое сопротивление электролита и токоотводов $R_{\text{ом}}$ включается последовательно с комплексным сопротивлением АБ. Индуктивная составляющая полного сопротивления АБ обусловлена поверхностным эффектом при прохождении тока через массивные металлические детали.

При разных соотношениях емкостной и индуктивной составляющих полного сопротивления наблюдается разная зависимость его от частоты. Низкое емкостное сопротивление характерно для АБ большой емкости. В АБ со сравнимыми значениями индуктивной и емкостной

составляющих зависимость полного сопротивления от частоты проходит через минимум [69]. На рис. 4.6 представлена зависимость АЧХ ФЧХ для АБ с рекомбинацией газа типа А 512 Sonnenschein.

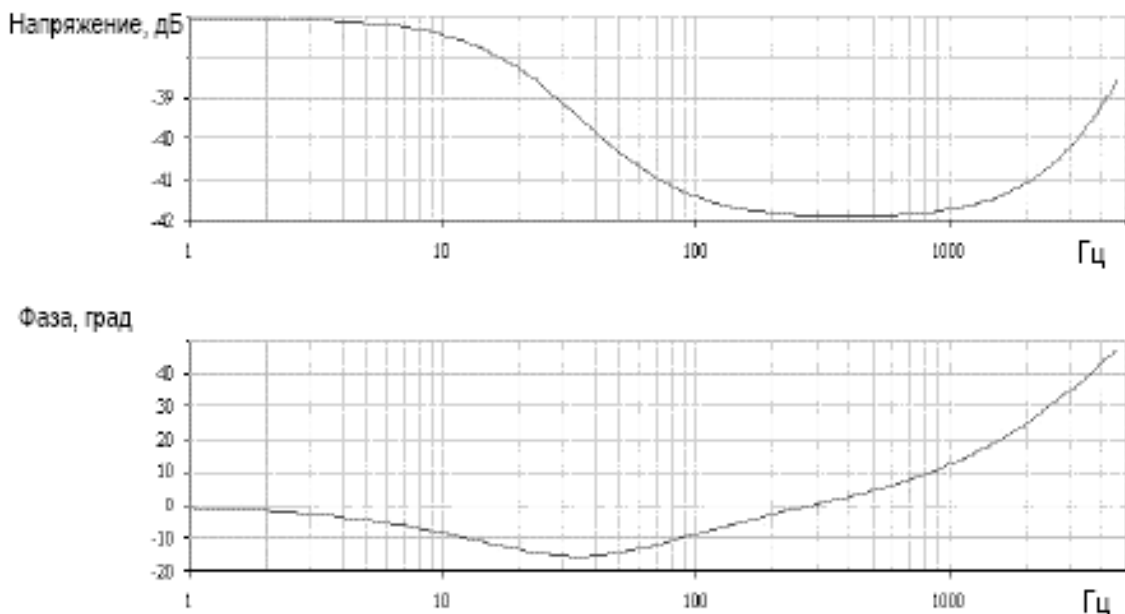


Рис. 4.6. АЧХ и ФЧХ свинцово-кислотной АБ типа А512 с рекомбинацией газа Sonnenschein 55 Ач: $L = 0,3 \mu\text{Гн}$; $R_{\text{ом}} = 0,008 \text{ Ом}$; $R_{\text{п}} = 0,006 \text{ Ом}$; $C_{\text{п}} = 1 \text{ Ф}$

Независимо от известных типов структурных схем СБЭП (см. глава 2) специфика применения АБ в них аналогична — чередование в едином техническом устройстве режимов «заряд — буфер — разряд — заряд — буфер — и т. д.» в течение длительного времени (как правило годы).

Основой любой статической СБЭП являются полупроводниковые коммутаторы — АИН, основные теоретические положения о которых достаточно полно отражены в целом ряде работ. Исследованию АБ посвящены такие основополагающие работы, как, например, [69, 71, 72, 77, 78]. Решение же конкретной прикладной задачи исследования СБЭП в виде «АБ — АИН — нагрузка» находится в настоящее время в начальной стадии и характеризуется некоторой разрозненностью материалов и наличием различных подходов.

Современная СБЭП является сложной системой автоматического регулирования с обратной связью по напряжению, наличием фазовой автоподстройки частоты и т. д. Кроме того, отличительной особенностью СБЭП является постоянный взаимообмен между АБ и нагрузкой во всех вышеуказанных циклах работы — даже в режиме «разряд» в случае индуктивной нагрузки в системе постоянно циркулирует реактивная энергия. Известно, что АБ является сложным объектом с изменяю-

щимися во времени параметрами, поэтому для удовлетворительного описания режимов СБЭП подход к АБ только как к источнику ЭДС с активным внутренним сопротивлением недостаточен. АБ необходимо рассматривать как соответствующее звено системы автоматического регулирования (САР) [78–81].

Пожалуй, первым отечественным исследованием, в котором АБ на основании физических представлений о двойном электрическом слое была представлена как совокупность активно-реактивных элементов $R-L-C$, следует считать работу [82]. Проведенные автором исследования позволили создать методику расчета коэффициента фильтрации для фильтров выпрямителей, имеющих в выходном звене свинцово-кислотные АБ типа С1–С20. Однако если в работе [82] индуктивному сопротивлению X_L автор приписывал лишь природу конструктивного характера АБ (пластины, борны), то в [83] впервые экспериментально показана возможность возникновения электрического резонанса в электрохимической ячейке и без наличия конструктивных элементов. Теоретическое обоснование этого явления приведено позже в [84].

Среди работ, имеющих прикладное значение для СЭП автономных устройств, следует отметить работы [85–87], в которых автор показал общую закономерность для характеристик разряда наиболее распространенных систем ХИТ и предложил методику по определению емкости АБ на основании измерения ЭДС, напряжения, токов нагрузки и короткого замыкания. Для ряда свинцово-кислотных батарей стартерного типа наблюдалась хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных.

С начала 70-х годов в прикладных работах, посвященных применению АБ в различных устройствах электропитания, уже широко используется термин «схема замещения аккумулятора» в виде соединения активных и реактивных элементов как упрощенная математическая формализация сложных электрохимических процессов в данном виде ХИТ [69, 82, 88, 89]. В это же время конкретизации отдельных составляющих схем замещения на основе расширения представлений о строении двойного электрического слоя, явлении поляризации и диффузии посвящаются работы по электрохимии [90, 91], появляются и развиваются частотные и импульсные методы определения составляющих полного внутреннего сопротивления АБ [69, 89, 92–94 и др.]. Так, в работе [92] исследуется влияние внутреннего сопротивления никель-железных АБ на характеристики приводов электроподвижного состава.

При этом составляющие внутреннего сопротивления схемы замещения определяются по временной характеристике напряжения АБ при воздействии импульса тока. Работа [95] посвящена расчету выбросов напряжения в автономной системе электроснабжения с генератором постоянного тока (ГПТ). В ней динамические свойства стартерных свинцовых АБ задаются в виде частотных характеристик полного сопротивления батареи $Z_{AB}(j\omega)$, что в совокупности с описанием регулятора напряжения (РН) и ГПТ позволило авторам получить динамическую модель «ГПТ–РН–нагрузка–АБ» по аналогии со структурными схемами САР.

Поскольку любая АБ является сложным многопараметрическим объектом, для прогнозирования поведения которого необходим учет большого количества факторов (напряжения, составляющих внутреннего сопротивления, давления, температуры, степени заряженности и т. д.), некоторые авторы предпочитают рассматривать АБ как «черный ящик» при обработке данных методом планирования эксперимента [96, 97]. Полученные таким образом формализованные полиномиальные зависимости являются математической моделью для заранее оговоренных режимов конкретных типов АБ.

Наиболее полно АБ, как объект автоматического регулирования, рассмотрены в работах коллектива сотрудников Сибирского государственного индустриального университета под руководством Е.В. Пугачева. Результаты многолетних исследований эксплуатации шахтных никель-железных тяговых АБ и герметичных никель-кадмиевых АБ для головных светильников нашли отражение в монографиях [81, 98] с обширной библиографией по данному вопросу.

Анализ приведенных литературных источников (и подобных им) показывает, что «типы» математических моделей АБ отличаются друг от друга степенью углубленности и детализации — от электрохимических, использующих в качестве исходных параметров ХИТ такие, как «концентрация», «удельная электропроводность», «заряд ионов», «коэффициент диффузии» и т. п., до статистических — типа «черный ящик», не претендующих на исходную информацию электрохимического плана. Тип модели определяется решаемыми ею задачами. Очевидно, что проектировщику СБЭП (при возможности применения различных типов АБ), как правило, недоступна информация электрохимического характера, используемая при проектировании ХИТ. При данном готовом аккумуляторе он располагает такими параметрами, как ЭДС, напряжение, ток, температура, полное внутреннее сопротивление, или им-

педанс (проводимость, или адмитанс), и, как производная, — емкость. Собственно, вокруг этих параметров и сгруппированы математические модели АБ. Качественно можно выделить модели:

- 1) использующие полуэмпирические формулы [85–87, 69];
- 2) обрабатывающие статистические данные с получением адекватной полиномиальной зависимости [96, 97];
- 3) на основе схем замещения [65, 69, 81, 82, 93, 98].

При этом следует отметить, что в конечном итоге первый и второй тип математического описания качественно мало отличаются друг от друга — в обоих случаях это полуэмпирические выражения. Эффективность применения третьей разновидности во многом зависит от качества определения параметров, отражающих электрохимические процессы двойного слоя «электролит—электрод». Несомненно то, что АБ является нестационарным нелинейным объектом, в котором составляющие, отражаемые схемой замещения, разделены в определенной мере условно, а на самом деле образуют органическое целое. При этом каждая составляющая «живет» по своим «электрохимическим» законам. Как справедливо отмечено в [89], использование различных методов определения дает различные результаты. Поэтому метод измерения должен быть тщательно обоснован исследователем, исходя из конкретных условий цепи, в которой будет работать АБ. Применительно к СБЭП это:

- чередование в едином техническом устройстве режимов «заряд—буфер—разряд—заряд—буфер — и т. д.» в течение длительного времени (как правило годы);
- постоянный взаимобмен энергией между нагрузкой и АБ при различных коэффициентах мощности нагрузки даже в режиме «разряд» (инвертор);
- мгновенный переход от режима заряда (буфера) к разряду;
- импульсная нагрузка;
- постоянный динамический режим АБ ввиду ее периодического подключения к нагрузке в соответствии с синусоидальной коммутационной функцией АИН с ШИМ.

При сформулированных условиях модель должна позволять решать следующие задачи:

- проводить анализ устойчивости СБЭП при работе на широкий спектр нагрузок;
- проводить расчет пульсаций и емкости компенсирующего конденсатора АИН;

- анализировать влияние состояния АБ на коэффициент гармоник выходного напряжения СБЭП;
- вычислять ресурс АБ в одном цикле;
- проводить диагностику АБ для оценки ее состояния непосредственно в рабочих режимах СБЭП [99].

На рис. 4.7 приведено концептуальное представление модели для описания режимов работы АБ в СБЭП.

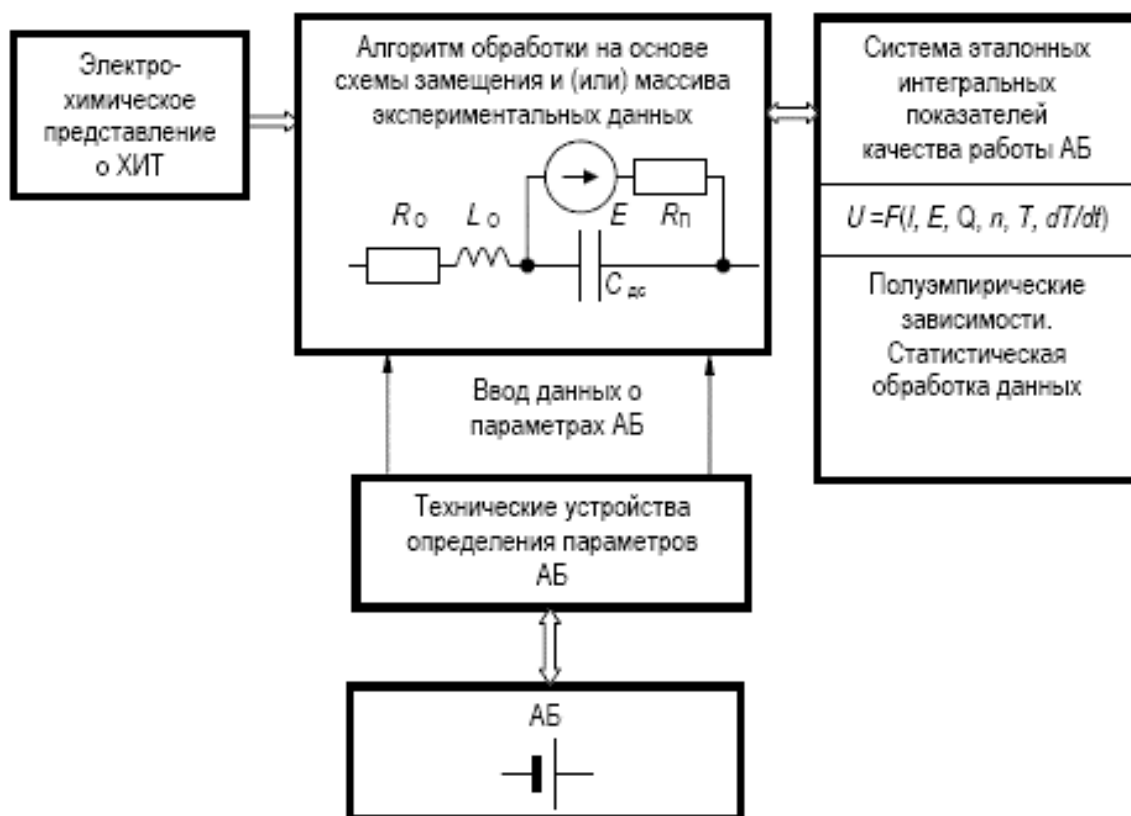


Рис. 4.7. Концептуальное представление модели для описания режимов работы АБ в СБЭП переменного тока

Центральное звено модели представлено схемой замещения АБ с ЭДС при допущении замены распределенных параметров на сосредоточенные. Отметим, что в многочисленных литературных источниках обходится вопрос о размещении (месте) ЭДС в схеме замещения. С одной стороны, этот вопрос не прост, так как существует тесная взаимосвязь между электрохимической реакцией и зарядом двойного слоя. С другой стороны, для исследования частных режимов АБ этого и не требуется и ЭДС с точки зрения преобразования энергии электромагнитного поля в энергию химических реакций (и наоборот) заменяется эквивалентной емкостью конденсатора [78]. Тем не менее, изначально место ЭДС в схеме замещения логично. По мнению автора,

наиболее отвечающая физике происходящих в аккумуляторе явлений схема замещения приведена в [92] при развитии ее в работе [80].

Как уже было отмечено, одна из особенностей работы АБ в составе СБЭП — невозможность или неудобство выведения ее (батареи) из работы для определения изменяющихся во времени параметров с целью диагностики АБ, как это возможно, например, при посменной работе шахтного электрооборудования. Отсюда следует необходимость наличия оригинальных технических устройств для непрерывного определения параметров схемы замещения в процессе работы СБЭП, когда рабочая точка АБ может находиться на любом участке зарядно-разрядной характеристики. При этом техническое устройство должно учитывать особенности применяемых электрохимических систем ХИТ. Так, например, есть принципиальное различие в постоянных времени АБ с жидким электролитом, твердым и гелеобразным, применяемым в герметичных ХИТ с рекомбинацией газа. После включения постоянного тока для установления стационарного распределения концентраций в приэлектродном слое необходимо определенное время. Если в АБ с жидким электролитом концентрационные изменения происходят в тонком слое электролита около поверхности электрода (по данным работы [77], $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м) за переходное время диффузионного процесса порядка $\tau_{п. \text{диф}} \approx 1$ с, то в АБ с гелеобразным или твердым электролитом конвективный процесс полностью исключен. В связи с этим $\tau_{п. \text{диф}}$ может достигать десятки или сотни секунд. По подобной же причине ввиду замедленности поступления электролита к поверхности электрода при разряде большими и импульсными токами кажущаяся емкость АБ меньше номинальной. Теоретическое обоснование данного вопроса проводится в работах [77, 100]. В АБ с жидким электролитом при включении АБ на разряд непосредственно после заряда характерно наличие неустойчивых экспоненциальных участков на разрядной характеристике в диапазонах 1,36...1,5 В; 1,5...1,7 В, обусловленных повышенной концентрацией кислорода на поверхности положительного электрода, которая может снижаться до равновесной до нескольких десятков часов.

АБ обладает комплексным сопротивлением, величина которого зависит от ее состояния. Ввиду этого емкости эквивалентного конденсатора, входящего в схему замещения АБ, может быть недостаточно для сглаживания пульсаций напряжения ввиду циркуляции в системе активной и реактивной энергии. Задачу оценки пульсаций напряжения и оценки компенсирующего конденсатора также можно отнести к зада-

чам динамики, решаемой моделью АБ. На рис. 4.8 представлена осциллограмма пульсации напряжения на АБ в цепи постоянного тока АИН с ШИМ без компенсирующего конденсатора.

Наконец, вычисление ресурса АБ в одном цикле является важной сервисной функцией современной СБЭП, решить которую возможно также с помощью модели АБ и вышеназванных технических устройств диагностики. В совокупности с учетом числа зарядно-разрядных циклов n и наличием эталонных показателей качества функционирования (напряжение U , ток I , температура T , градиент температур dT/dt , емкость Q и др.) модель может обладать возможностью оценки интегральных показателей качества работы АБ.

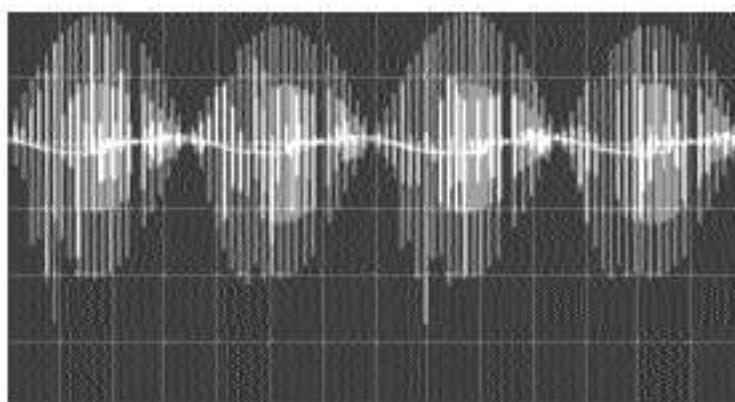


Рис. 4.8. Пульсация напряжения на свинцово-кислотной АБ типа Sonnenschein (15 шт. послед.) в АИН с ШИМ без компенсирующего конденсатора;
 $m_U = 5 \text{ В/дел}$

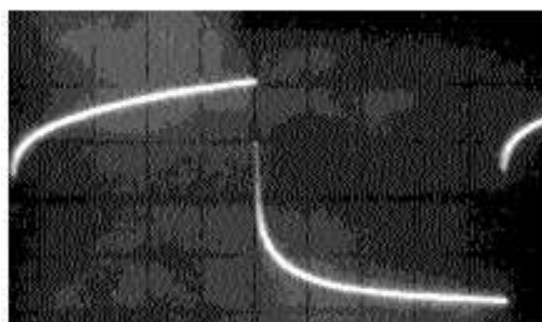


Рис. 4.9. Экспериментальная переходная характеристика СК АБ типа СТ55 55Ач: протекание импульса тока 30 А; $m_U = 100 \text{ мВ/дел}$; $f_{\text{и}} = 10 \text{ Гц}$; $Q/Q_{\text{н}} = 100 \%$

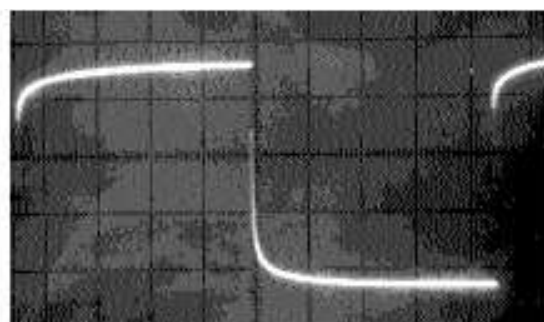
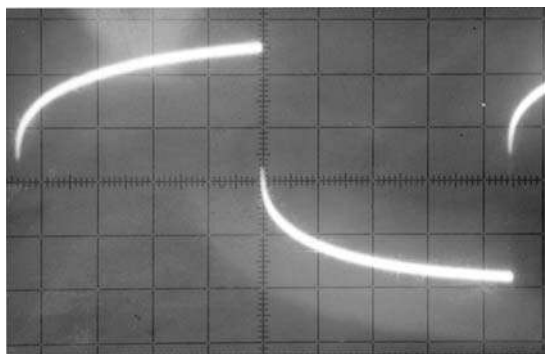
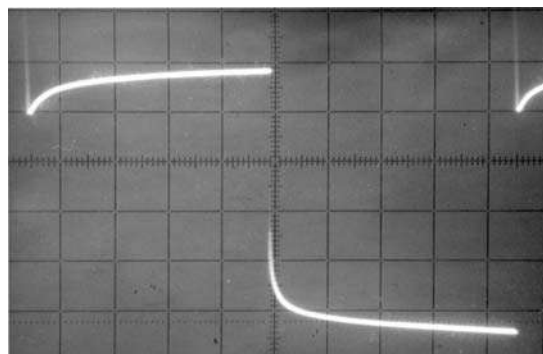


Рис. 4.10. Экспериментальная переходная характеристика СК АБ с рекомбинацией типа А512 Sonnenschein 85 Ач: протекание импульса тока 57 А; $m_U = 100 \text{ мВ/дел}$; $f_{\text{и}} = 10 \text{ Гц}$; $Q/Q_{\text{н}} = 10 \%$



*Рис. 4.11. Экспериментальная переходная характеристика СК АБ с рекомбинацией типа А512
Sonnenschein 10 Ач: протекание импульса тока 1,11 А;
 $m_Y = 20 \text{ мВ/дел}$; $f_H = 10 \text{ Гц}$; $Q/Q_H = 50 \%$*



*Рис. 4.12. Экспериментальная переходная характеристика щелочной АБ типа 9НКЛБ70 70Ач: протекание импульса тока 52 А;
 $m_Y = 200 \text{ мВ/дел}$; $f_H = 10 \text{ Гц}$; $Q/Q_H = 100 \%$*

Как справедливо отмечено в [78], АБ, строго говоря, не описывается передаточными функциями простейшего «классического вида». Это следует и из вышеприведенных рассуждений. Так, например, реальные зависимости тока или напряжения АБ не похожи на экспоненциальную зависимость: в начале переходного процесса экспериментальная кривая круче экспоненты, а затем становится положе любой экспоненты с наперед заданной постоянной времени. В качестве иллюстраций, рис. 4.9–4.12, представлены экспериментальные переходные кривые напряжения на АБ различных типов при протекании через АБ импульсов тока.

В настоящее время для оценки состояния ХИТ широко используется метод переменного токового импеданса [101]. Этот метод характеризуется высокой точностью и надежностью, большой информативностью и состоит в измерении внутреннего сопротивления ХИТ и определении частотных характеристик системы при воздействии переменного тока. Возможности применения метода ограничиваются сложностью используемой аппаратуры, ее высокой стоимостью, а также достаточно большой длительностью процесса снятия частотных характеристик.

В [102] рассмотрены возможности метода операционного импеданса, который состоит в определении отношения операторного изображения реакции системы к операторному изображению входного сигнала (скачок, импульс, сигнал произвольной формы). Метод позволяет в значительной мере сократить время эксперимента и определять операционный импеданс в условиях нормальной эксплуатации аккумуляторных источников питания.

Рассмотрим возможность развития метода операционного импеданса, используя численные процедуры получения математических моделей. С этой целью для построения математических описаний объектов идентификации предлагается использовать вещественный интерполяционный метод (ВИМ), разработанный В.И. Гончаровым [79, 103]. Одно из его основных достоинств — ориентация на широкий класс операторных моделей, которые могут содержать дробно-рациональные, иррациональные и трансцендентные выражения. Привлечение ВИМ позволяет устранить серьезные препятствия, возникающие при частотном подходе к получению моделей, учитывающих распределенность параметров, так как получение их частотных характеристик связано с принципиальными трудностями, иногда непреодолимыми.

Вещественный интерполяционный метод базируется на интегральном преобразовании:

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [C, \infty], \quad C \geq 0, \quad (4.11)$$

где $f(t)$ — оригинал функции-изображения $F(\delta)$; t и δ — переменные, соответственно, в области оригиналов и изображений; C — параметр, определяющий условие сходимости интеграла.

Выражение (4.11) может быть получено как частный случай преобразования Лапласа при замене комплексной переменной $p = \delta + j\omega$ на вещественную δ . Эта особенность является принципиальной при организации численных процедур обработки информации, обеспечивая резкое снижение вычислительных затрат — более чем в 2 раза по сравнению с частотным методом [103].

Для применения вещественных функций при выполнении численных расчетов необходимо осуществить переход от непрерывных функций-изображений $F(\delta)$ к их дискретным аналогам. За основу перехода принят интерполяционный метод, который позволяет, во-первых, по заданной системе узлов δ_i , $i = 1, 2, \dots, \eta$ сформировать численную модель $\{F(\delta)\}_\eta$ функции $F(\delta)$, называемую численной характеристикой (ЧХ), а во-вторых, осуществить обратный переход — от ЧХ $\{F(\delta)\}_\eta$ к аналитическому выражению $F(\delta)$. При этом параметр η имеет смысл размерности численной характеристики, а его однозначное соответствие числу коэффициентов функции $F(\delta)$ обеспечивает взаимосвязь между $F(\delta)$ и $\{F(\delta)\}_\eta$.

Ключевым этапом при использовании ВИМ в решении многих задач, в первую очередь приближенных, является выбор узлов интерполирования δ_i , $i = 1, 2, \dots, \eta$. Он включает в себя два вопроса: назначение границ расположения узлов и задание сетки их распределения. Для

практических целей выбор узлов интерполирования можно производить исходя из условий:

$$\delta_i = \delta_1 \cdot i, \quad \delta_1 = \Delta / t_p, \quad (4.12)$$

где t_p — время регулирования рассматриваемой системы, Δ — инструментальная переменная, обеспечивающая настройку параметров модели на минимум принятого критерия решения задачи. В качестве первого приближения можно принять $\Delta = 10,35$ [104].

Рассмотрим линейный одномерный непрерывный объект в отсутствии помех. Пусть на вход объекта подан единичный ступенчатый сигнал $1(t) = x(t)$ и получена переходная функция $h(t)$. В этом случае вещественная передаточная функция (ПФ) по определению принимает вид

$$W(\delta) = \frac{h(\delta)}{1/\delta}, \quad (4.13)$$

где $h(\delta) \doteq h(t)$, $1/\delta \doteq 1(t)$ — изображения сигналов входа и выхода.

Соотношения (4.12) и (4.33) позволяют установить связь между элементами ЧХ $\{W(\delta_i)\}_\eta$ функции $W(\delta)$ и переходной характеристикой $h(t)$:

$$W(\delta_i) = \delta_i \int_0^\infty h(t) e^{-\delta_i t} dt \approx \delta_i \sum_{j=0}^N h_j(t) e^{-\delta_i t} \Delta t, \quad i = 1, \dots, \eta, \quad \eta = n + m + 1. \quad (4.14)$$

Отметим существенное обстоятельство: применение операции интегрирования при нахождении ЧХ системы вследствие сглаживающего эффекта интегральных преобразований определяет высокие свойства помехозащищенности получаемых моделей, соответствующие уровню частотного метода.

Следует отметить и второе важное обстоятельство: ЧХ можно рассматривать как модели объектов в непараметрической форме, что в определенной степени придает свойство робастности идентифицируемой системе [105, 106].

Вычисленные по формуле (4.14) элементы $\{W(\delta_i)\}_\eta$ образуют модель объекта в виде его ЧХ. Для перехода к ПФ примем, что объект описывается рациональной дробью

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad n \geq m. \quad (4.15)$$

Задача состоит в определении коэффициентов a_k , $k = 1 \dots n$ и b_j , $j = 0 \dots m$ передаточной функции (4.15) при заданных значениях степеней m и n полиномов числителя и знаменателя ПФ. Ее решение состав-

вляет суть обратной задачи – определение коэффициентов аналитического выражения по ЧХ. В обозначениях рассматриваемой задачи это связано с формированием системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ),

$$W(\delta_i) = \frac{b_m \delta_i^m + b_{m-1} \delta_i^{m-1} + \dots + b_1 \delta_i + b_0}{a_n \delta_i^n + a_{n-1} \delta_i^{n-1} + \dots + a_1 \delta_i + 1}, \quad i = \overline{1, \eta}. \quad (4.16)$$

Для этой цели в выражении (4.15) осуществляется переход от комплексной переменной p к вещественной. Правомерность замены можно установить по формуле прямого δ -преобразования (3.11). Действительно, предположим, что в (3.11) $F(\delta) = W(\delta)$, тогда $f(t)$ приобретает смысл импульсной реакции $k(t)$. Считаем объект устойчивым, что означает выполнение условия $\int_0^\infty k(t) dt < \infty$, сходимость интеграла в (3.41), справедливость перехода $s \rightarrow \delta$, $\delta \in [0, \infty]$, и, наконец, обоснованность формирования СЛАУ (4.16).

Можно показать, что существуют условия, при выполнении которых СЛАУ имеет решение, и оно единственно [103].

Для проверки полученного решения $W(\delta)$ осуществляется обратный переход $\delta \rightarrow p$, который справедлив всегда [103], затем находится ПФ $W(p)$ и какая-либо соответствующая ей временная динамическая характеристика. В рассматриваемой задаче представляет интерес переходная характеристика модели $h_m(t) \doteq W(p)/p$, так как исходная характеристика идентифицируемого объекта является переходной $h(t)$. Погрешность идентификации целесообразно определять по функции

$$\Delta h(t) = \frac{h(t) - h_m(t)}{h(t)}, \text{ а также различными оценками на ее основе.}$$

Вполне возможно, что полученное решение задачи не будет удовлетворять некоторым требованиям, предъявляемым к $\Delta h(t)$. Причины такого результата могут быть различными (недостаточные значения параметров m и/или n , высокие требования по точности и другие). В этой ситуации ВИМ позволяет воспользоваться механизмом параметрической настройки, который обеспечивает снижение погрешности $\Delta h(t)$. Инструментальной переменной механизма здесь выступает параметр Δ из (4.12). Его изменение приводит к смещению узлов интерполирования, и как следствие – изменению погрешности $\Delta h(t)$. Процедура настройки позволяет найти $\min_i |\Delta h(t)|$, т. е. оптимальное в этом смысле решение. Дополнительно необходимо добавить, что в рамках другой

итерационной процедуры ВИМ возможно получение решений, близких к наилучшим равномерным приближениям [107].

Постановка задачи для ХИТ. Имеется экспериментальная переходная характеристика $h(t)$ АБ (например, см. рис. 4.9–4.12). Она может быть представлена графиком или таблицей дискретных значений. Требуется найти коэффициенты ПФ (4.15), которая, по априорным сведениям, при заданных значениях параметров m и n с достаточной точностью описывает АБ. ПФ ХИТ может иметь более сложный вид, учитывающий распределенность параметров [79]:

$$W(p) = F[p, \sqrt{p}, e^{Tp}, e^{\sqrt{Tp}}, \dots]. \quad (4.17)$$

Требуется найти коэффициенты функций (4.15), (4.17), обеспечивающие близость переходной характеристики $h(t)$ и ее модели $h_m(t)$.

Критерии близости функций $h(t)$ и $h_m(t)$ могут быть различными, но все они тем или иным образом оценивают отклонение $\Delta h(t) = h(t) - h_m(t)$. Наиболее предпочтительной считается оценка

$$\Delta h = \max_t |\Delta h(t)| \quad (4.18)$$

и связанный с ней критерий точности

$$\max_t |\Delta h(t)| \leq \Delta h_{\text{доп}}, \quad (4.19)$$

где $\Delta h_{\text{доп}}$ — допустимая величина погрешности решения задачи. Обычно принимают оценку (4.19), которая является достаточно полной характеристикой точности результата идентификации. Однако когда значения структурных параметров m и n фиксированы, а величина $\Delta h_{\text{доп}}$ мала, может оказаться, что задача не имеет решения. При такой перспективе более практичным будет иной критерий на основе (4.18):

$$\max_t |\Delta h(t)| \rightarrow \min. \quad (4.20)$$

В достаточно сложной задаче идентификации ХИТ в форме моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами, когда конечный результат предсказать трудно, будем считать критерий (4.20) предпочтительным.

Решение. АБ представляет собой цепь с распределенными параметрами, обладающую активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью [78]. Как было отмечено ранее, для математических моделей процессов, протекающих в АБ, используют два подхода. Первый использует методы эквивалентных преобразований и позволяет получить дробно-рациональные ПФ. Второй подход учитывает распределен-

ность параметров ХИТ, что приводит к более сложным зависимостям, в частности операторные модели могут содержать иррациональные и трансцендентные выражения.

В первом случае достаточно часто используется схема замещения ХИТ [69, 81], представленная на рис. 4.7. При этом для получения модели выбирается ПФ вида [78]:

$$W(p) = \frac{k_a(Tp + 1)}{(T')^2 p^2 + Tp + 1}, \quad (4.21)$$

где $k_a = \frac{1}{R_0 + R_{\pi}}$ – коэффициент передачи АБ, $T = \frac{r_0}{R_0 + R_{\pi}} \cdot (T_0 + T_{\pi})$,

$T' = \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + R_{\pi}} \cdot T_0 \cdot T_{\pi}}$; $T_0 = \frac{L_0}{R_0}$ – постоянная времени, обусловленная

индуктивностью АБ; $T_{\pi} = R_{\pi} C_{\pi}$ – постоянная времени поляризации.

Для дальнейшего использования целесообразно привести (4.21) к стандартной форме ПФ:

$$W(p) = \frac{k_a(T_p p + 1)}{(T')^2 p^2 + T \cdot p + 1} = \frac{k_a T_p p + k_a}{(T')^2 p^2 + T \cdot p + 1} = \frac{b_1 p + k_a}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}. \quad (4.22)$$

Коэффициент k_a найдется из установившегося режима, рис. 4.9–4.12, по АЧХ при $\omega = 0$, согласно, например, [69], поэтому определению подлежат коэффициенты b_1 , a_2 и a_1 , по которым можно легко найти параметры ПФ (3.51) и значения элементов схемы замещения ХИТ.

Для конкретной задачи рассмотрим идентификацию АБ A512 Sonnenschein для СБЭП. Имеется экспериментальная переходная характеристика $h(t)$. Обработка результатов эксперимента и получение численных значений параметров функций (4.15), (4.17) выполнялись идентификатором на базе модуля вычислителя MSU42-3, в память которого была записана программа идентификации на основе алгоритмов ВИМ, изложенных выше. Величина коэффициента передачи АБ $k_a = 235$ найдена по установившемуся значению переходной характеристики. Время регулирования переходного процесса также известно, оно принято равным $t_p = 0,05$ с. Значения коэффициентов ПФ (4.22), полученные при различном расположении сетки узлов интерполирования, представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№	Δ	b_1	a_2	a_1
1	6	196,4504	$1,103193E-3$	0,82654049
2	8	112,06604	$6,398803E-4$	0,46680519
3	10,35	33,906769	$2,011818E-4$	0,13637626
4	12	18,589519	$1,1354112E-4$	$7,2212759E-2$
5	15	8,3362156	$5,358597E-5$	$2,9826245E-2$

Графики переходных характеристик $h_j(t)$, $j = \overline{1,5}$, соответствующие различным моделям и экспериментальной переходной характеристике $h(t)$ АБ, приведены на рис. 4.13. Семейство графиков показывает, что изменением переменной D в (4.12) возможно осуществлять параметрическую настройку модели (4.22) на минимизацию интересующего нас критерия. Для пояснения можно обратить внимание на важную закономерность. Она состоит в том, что при увеличении значения параметра D снижается величина отклонения $Dh(t)$ в области больших значений $t \in [0, t_p]$. Напротив, при уменьшении значения D уменьшается отклонение на участке малых значений при одновременном возрастании погрешности на других участках интервала $[0, t_p]$. Таким образом, речь идет о перераспределении погрешности и возможности настройки модели (4.22) на минимальное значение отклонения $\Delta h = \max_i |\Delta h(t)|$. В данной задаче минимум Dh достигнут при $D = 6$.

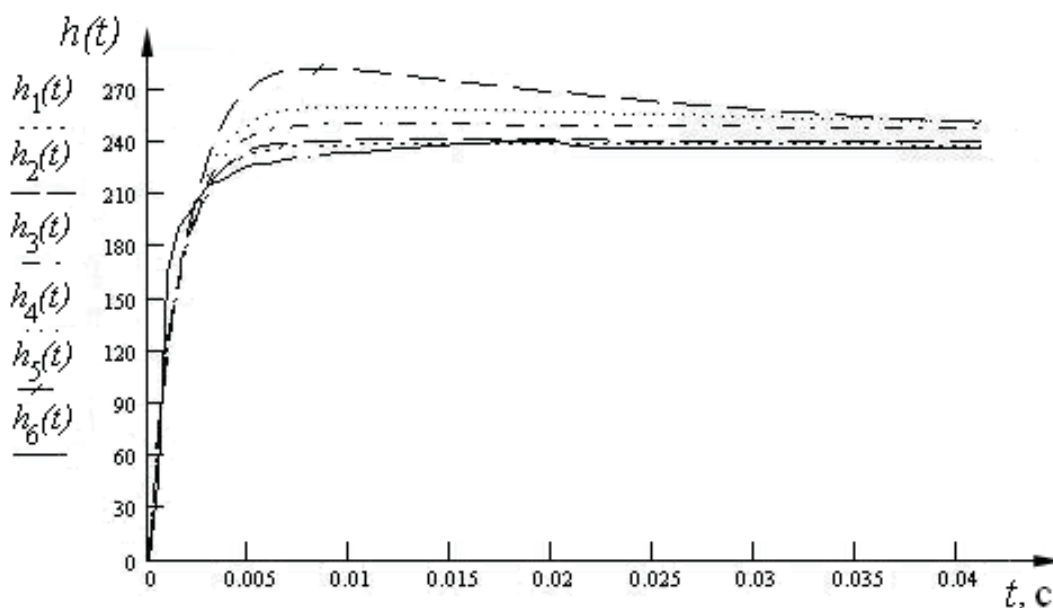


Рис. 4.13. Переходные характеристики моделей АБ вида (4.22)

К вышеизложенному следует добавить, что в ряде случаев требуется получать модели, имеющие повышенную точность в области малых или больших значений $t \in [0, t_p]$. Тогда настроечный параметр соответственно увеличивается или уменьшается до уровня, при котором погрешность в области времени на заданном участке интервала $[0, t_p]$ достигнет приемлемого значения.

Упрощенные схемы замещения и получаемые на их основе модели ХИТ с сосредоточенными параметрами могут вносить существенную погрешность в расчеты энергетики АБ [98]. Поэтому повышенный интерес представляют модели, учитывающие распределенность параметров. Однако, как было отмечено, вычисление значений параметров таких моделей встречает принципиальные трудности. ВИМ снижает уровень вычислительных и принципиальных трудностей и позволяет решать параметрические задачи идентификации АБ. В качестве моделей, учитывающих распределенность параметров ХИТ, может быть приведено описание объекта исследований передаточными функциями вида $W_1(p)$, $W_2(p)$:

$$W_1(p) = \frac{k_a}{T_1 \cdot p + 1} \cdot e^{-\alpha \sqrt{p}}, \quad W_2(p) = \frac{k_a}{\sqrt{T_2 \cdot p + 1}}. \quad (4.23)$$

Задача определения параметров $W_1(p)$ заключается в получении значений параметров T_1 и α . С этой целью составляется система уравнений

$$\begin{cases} W_1(\delta_1) = \frac{235 \cdot e^{-\alpha \sqrt{\delta_1}}}{T_1 \delta_1 + 1} \\ W_2(\delta_2) = \frac{235 \cdot e^{-\alpha \sqrt{\delta_2}}}{T_1 \delta_2 + 1} \end{cases}, \quad (4.24)$$

использующая узлы $\delta_1 = 200,465$, $\delta_2 = 400,930$. К сожалению, существующие программные средства не позволили получить однозначного решения системы. Причины этого выяснились при графическом поиске решения. Для поиска решения таким методом система (4.24) была приведена к более удобной для графических построений форме:

$$\begin{cases} T_1'(\alpha) = \frac{235 \cdot e^{-\alpha \sqrt{\delta_1}} - W_1(\delta_1)}{\delta_1 \cdot W_1(\delta_1)} \\ T_2''(\alpha) = \frac{235 \cdot e^{-\alpha \sqrt{\delta_2}} - W_1(\delta_2)}{\delta_2 \cdot W_1(\delta_2)} \end{cases}. \quad (4.25)$$

Множество полученных решений представлено на рис. 4.14 в виде функций $T_1' = f(\alpha)$ и $T_2'' = f(\alpha)$.

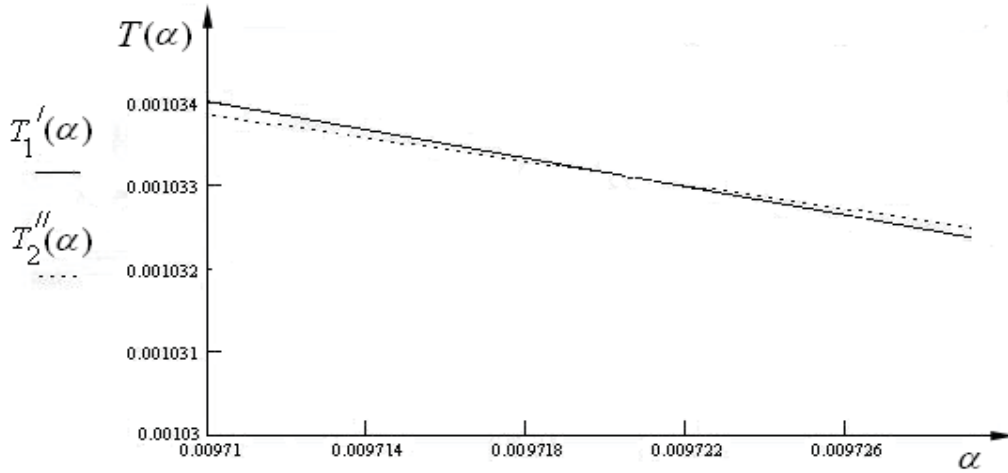


Рис. 4.14. Функциональная зависимость $T_1' = f(\alpha)$ и $T_2'' = f(\alpha)$

Чрезвычайно малый угол, под которым пересекаются зависимости, свидетельствует о некорректности задачи, низкой обусловленности соответствующих матриц и трудностях численного решения системы уравнений. Примем следующие значения графического решения: $T = 1,033E-3$ и $\alpha = 0,00972$.

Для отыскания значения параметра T_2 ПФ $W_2(p)$ (4.23) составляется уравнение:

$$W_2(\delta) = \frac{235}{\sqrt{T_2 \cdot \delta + 1}}, \quad (4.26)$$

отсюда находится аналитическое решение:

$$T_2 = \frac{\left(\frac{235 - W_2(\delta)}{W_2(\delta)} \right)^2}{\delta}. \quad (4.27)$$

Удовлетворительные по критерию (4.20) результаты были получены при $\Delta = 5$ и $\delta = 96,8$, когда $T_2 = 1,804E-4$.

Графики исходной характеристики системы $h(t)$ и переходные характеристики полученных моделей $h_1(t)$, $h_2(t)$ для (4.23) представлены на рис. 4.15.

Они показывают, что при использовании ПФ вида (4.23) достигается, в общем случае, более высокая, чем для моделей с сосредоточенными параметрами, близость временных динамических характеристик объекта и идентифицированной модели. Необходимо также отметить

сохраняющуюся возможность осуществить параметрическую настройку передаточных функций (4.23) по критерию (4.20) путем соответствующего изменения параметра Δ в (4.12).

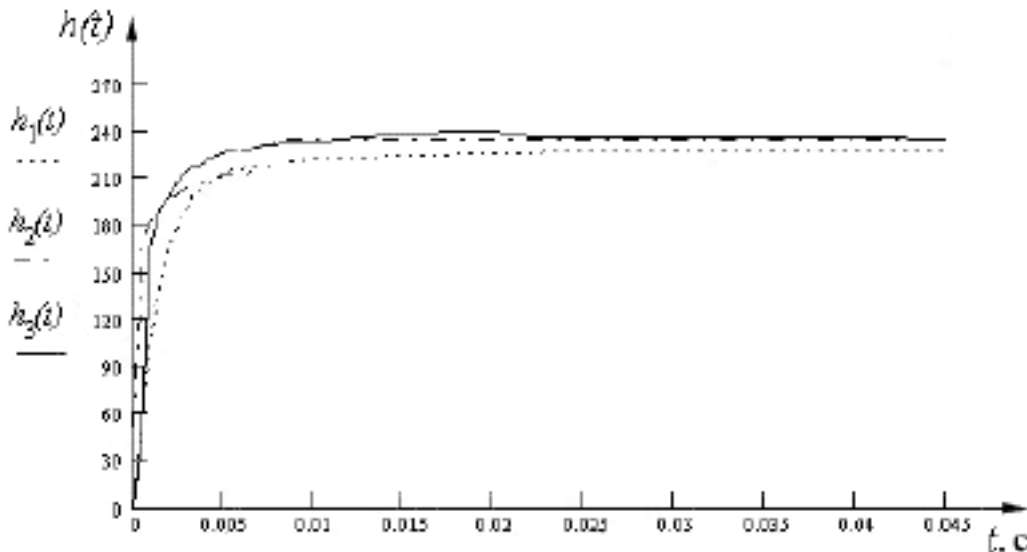


Рис. 4.15. Графики переходных характеристик идентифицированной модели АБ (4.24) $h_1(t)$, $h_2(t)$ и исходного объекта $h(t)$

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что имеется возможность получать модели АБ. Математическим инструментом может выступать вещественный интерполяционный метод. Он позволяет получать модели в виде дробно-рациональных ПФ, а также более сложных, учитывающих распределенность параметров АБ. Последнее обстоятельство представляется особенно важным, поскольку позволяет получать более точные модели, в большей степени учитывающие особенности ХИТ, и, следовательно, более полно отражать картину протекающих в них электрических процессов.

4.7. Информативные свойства автономных инверторов в СБЭП переменного тока

В СБЭП переменного тока информативные свойства АИН могут быть использованы для определения параметров и текущего состояния АБ. Ниже приведен краткий анализ методов получения информации о параметрах химических источников тока, и далее, на основе концепции автора [80], изложенной в разд. 4.5, рассмотрены информативные возможности АИН при оперативном определении параметров и состояния АБ в СБЭП.

Среди многочисленных методов оценки состояния химических источников тока в процессе их эксплуатации и хранения наиболее ин-

формативными являются релаксационные методы [69, 91, 101, 102]. Когда доступ внутрь АБ исключен, эти методы являются единственно возможными.

В последние годы в лабораторной практике для исследования поведения указанных выше систем используется метод переменного-токового импеданса. Этот метод характеризуется высокой точностью и надежностью измерений, возможностью проведения исследований в широком диапазоне частот переменного тока, что позволяет получить информацию о механизме процессов, протекающих на отдельных электродах источников тока, о структурных параметрах электродных активных масс и об электрическом состоянии источников тока в целом.

В методе операционного импеданса [69, 101, 102], как и в любом другом релаксационном методе, АБ с помощью какого-либо электронного устройства выводится из состояния равновесия. Это электрическое возмущение может представлять собой либо скачок напряжения между электродами, скачок тока или сигнал произвольной, удобной для исследователя формы. Анализ отклика АБ на возмущение позволяет получить информацию, необходимую для расчета электрохимических параметров, характеризующих исследуемую АБ.

Особенность метода операционного импеданса заключается в том, что в расчетах используются не реально измеренные зависимости напряжения $\eta(t)$ и тока от времени, а их изображения $\eta(p)$ и $i(p)$, полученные с помощью интегрального преобразования Лапласа:

$$\eta(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \eta(t) dt \quad \text{и} \quad i(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} i(t) dt, \quad \text{где } p \text{ — комплексный параметр.}$$

Операционный импеданс $Z(p)$ определяется как отношение изображения напряжения к изображению тока $Z(p) = \eta(p)/i(p)$, в котором параметр p играет роль частоты, так как математические выражения для операционного импеданса различных электрохимических систем совпадают с выражениями для переменного-токового импеданса, если в последних заменить произведение $j\omega$ (ω — круговая частота переменного тока) на параметр p [83]. Метод операционного импеданса позволяет определить весь спектр импеданса в широкой области частот из одного импульса.

На рис. 4.9–4.12 представлены экспериментальные переходные характеристики, а на рис. 4.6 частотные, полученные авторами с помощью схемы, рис. 4.16, при исследовании свинцово-кислотных АБ с комбинацией газа, применяемых в СБЭП.

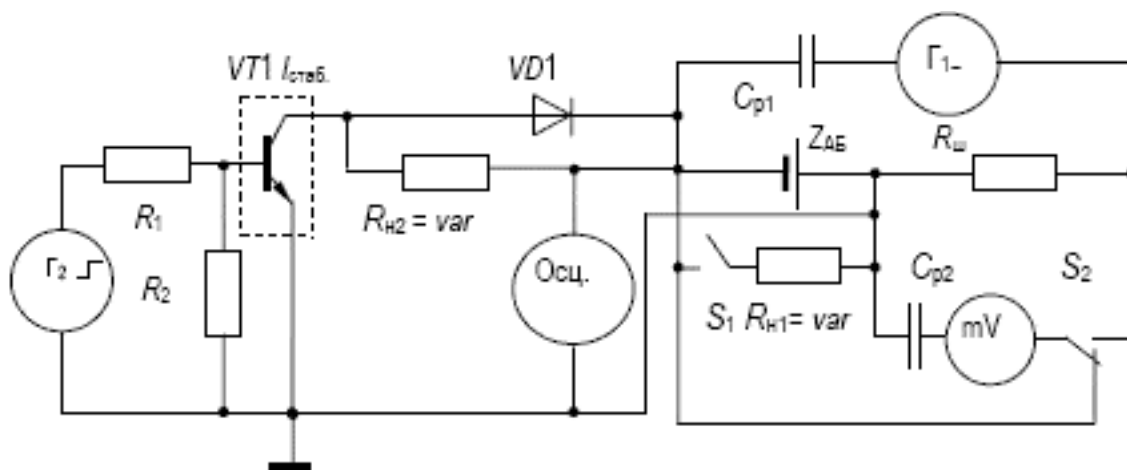


Рис. 4.16. Схема испытательного стенда для получения переходных и частотных характеристик АБ

Пример переходных характеристик для щелочных никель-кадмиевых АБ типа 9НКЛБ-70 приведен на рис. 4.12. При этом переходные характеристики получены воздействием на АБ единичного импульса тока типа «ступенька», а частотные — при пропускании через АБ переменного тока изменяемой частоты и постоянной амплитуды величиной 100 мА.

Согласно схеме — рис. 4.16 — синусоидальный сигнал переменной частоты формируется генератором Γ_1 , а ступенчатое воздействие — генератором Γ_2 . При пропускании тока переменной частоты через АБ справедливо следующее соотношение:

$$Z_{AB} = \frac{\frac{U_{AB} R_{ш}}{R_{н}} R_{н}}{R_{н} - \frac{U_{AB} R_{ш}}{U_{ш}}}, \quad (4.28)$$

где Z_{AB} — общее сопротивление АБ, $R_{н}$ — сопротивление нагрузки, $R_{ш}$ — сопротивление шунта, U_{AB} — напряжение на АБ, $U_{ш}$ — напряжение на шунте.

Исходя из представлений о внутреннем сопротивлении АБ, омическое и поляризационное сопротивления при известной постоянной величине импульсного тока могут быть получены непосредственно из переходных характеристик по закону Ома (см. рис. 4.17) [69]. Сумма полного активного сопротивления также легко определяется из частотных характеристик при $\omega = 0$. Обращает на себя внимание тот факт, что при больших токах нагрузки снижается поляризационная составляющая сопротивления. Это объясняется тем, что после включения распределение ионов в двойном слое химического источника тока не сразу возвращается к исходному состоянию. Поэтому любое предше-

ствующее включение тока уменьшает поляризационную составляющую тем сильнее, чем меньше истекло времени от включения нагрузки до измерения и чем сильнее был ток предшествующего включения.

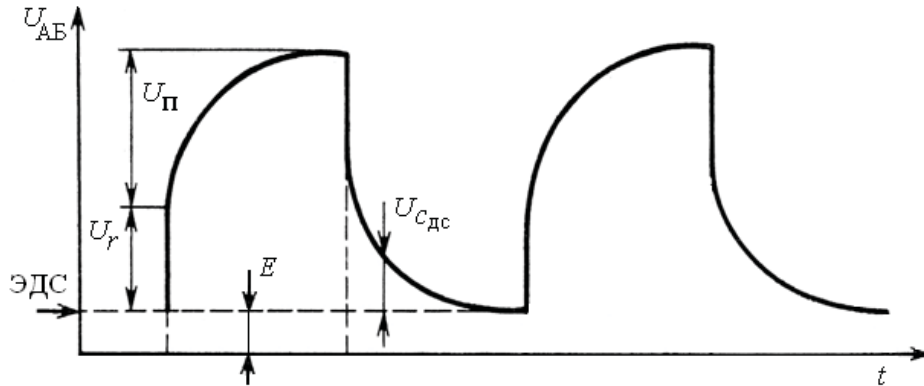


Рис. 4.17. К определению поляризационного и омического сопротивлений АБ

Процесс получения параметров коэффициентов передаточной функции по переходной характеристике методом ВИМ был показан в разд. 4.5. Используя экспериментальную частотную характеристику и физическое представление о химическом источнике тока, интерпретированном в схему замещения, можно определить коэффициенты передаточной функции, если известен ее вид:

$$W_{AB}(p) = K \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}. \quad (4.29)$$

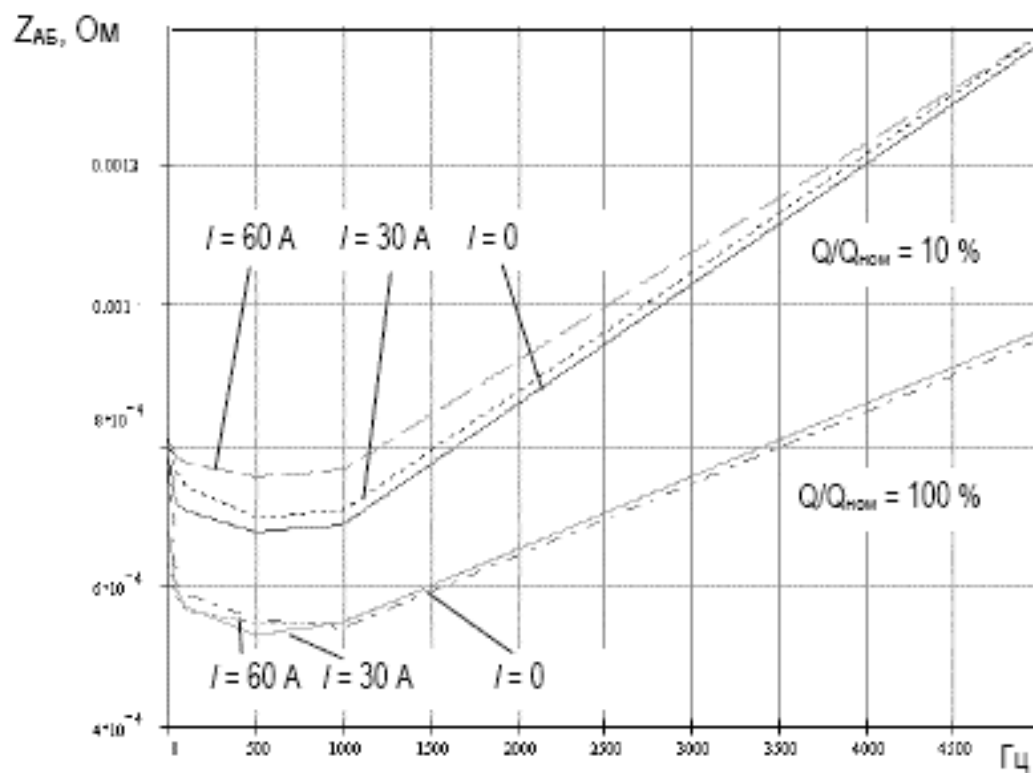
Фактически для решения данной задачи необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} |W(j\omega_1)| = |Z(j\omega_1)| \\ |W(j\omega_2)| = |Z(j\omega_2)| \\ \dots\dots\dots \\ |W(j\omega_m)| = |Z(j\omega_m)| \end{cases}, \quad (4.30)$$

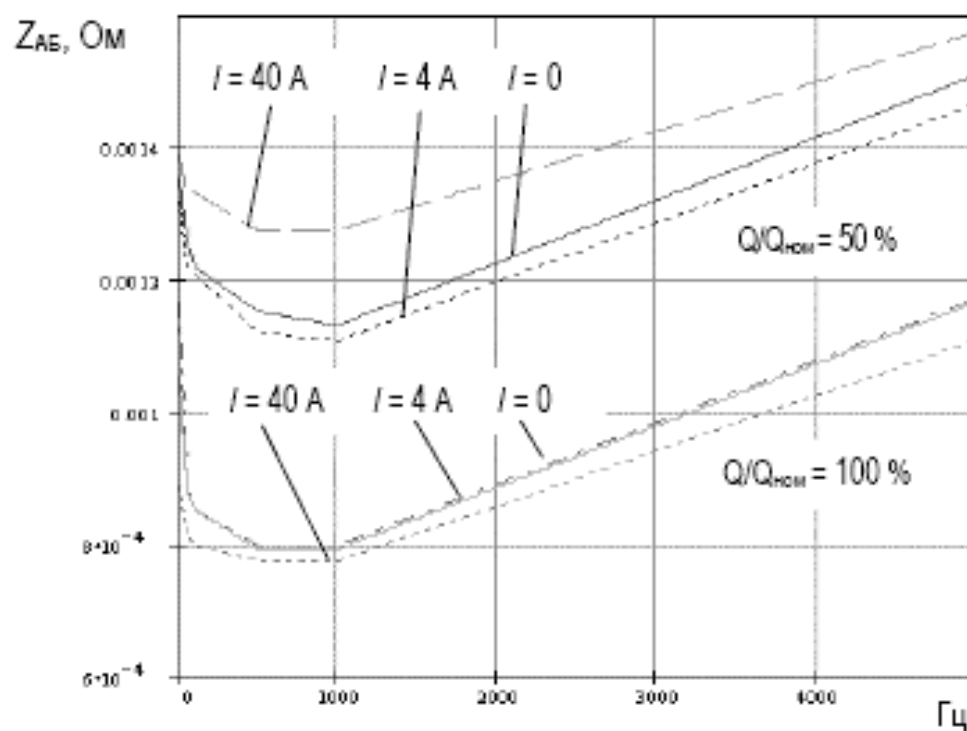
где $\omega = 2\pi f$; m — количество экспериментов (т. е. частот, на которых были проведены эксперименты: $f = 10, 50, 100, 500, 1000$ и 5000 Гц); $|Z(j\omega)|$ — полное сопротивление АБ (рис. 4.18).

Представим систему (4.30) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{T_1 K j\omega_1 + K}{T_2 j\omega_1 + 1} = \gamma_1 + j\beta_1 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{T_1 K j\omega_m + K}{T_2 j\omega_m + 1} = \gamma_m + j\beta_m \end{cases}. \quad (4.31)$$



a



b

Рис. 4.18. Экспериментальные частотные характеристики АБ Sonnenschein A512:
а) 85 Ач; б) 55 Ач

Данная система не совместна при $m > 3$ (3 – число неизвестных: T_1 , T_2 , K). В данном случае $m = 6$, поэтому невозможно точно получить значения неизвестных T_1 , T_2 , K обычными математическими методами. Для решения полученной системы уравнений (получения приближённых значений) воспользуемся методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{T_1 K j \omega_i + K}{T_2 j \omega_i + 1} - (\gamma_i + j \beta_i) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (4.32)$$

Согласно (4.32) необходимо минимизировать квадрат разности значений модели и значений внутреннего сопротивления АБ, полученных экспериментально, на всех частотах эксперимента.

Выделим мнимую и действительную части, и запишем систему уравнений в матричном виде:

$$BX = Y$$

при

$$B = \begin{bmatrix} KT_1 \\ T_2 \\ K \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \omega_1 & 1 \\ \omega_1 & -\gamma_1 \omega_1 & 0 \\ \dots & & \\ \dots & & \\ 0 & \beta_m \omega_m & 1 \\ \omega_m & -\gamma_m \omega_m & 0 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_m \\ \gamma_m \end{bmatrix}. \quad (4.33)$$

Используя известное из теории МНК выражение $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ и математический пакет *Mathcad*, находим искомый результат – матрицу неизвестных коэффициентов модели.

При этом результаты в виде АЧХ выглядят следующим образом:

$$W(j\omega) = 7,174 \cdot 10^{-4} \frac{5,099 \cdot 10^{-5} j\omega + 1}{4,831 \cdot 10^{-6} j\omega + 1} \quad (4.34)$$

– для аккумулятора 55 Ач серии Sonnenschein A512 (при $Q/Q_H = 10 \%$);

$$W(j\omega) = 6,02 \cdot 10^{-4} \frac{3,907 \cdot 10^{-5} j\omega + 1}{4,831 \cdot 10^{-6} j\omega + 1} \quad (4.35)$$

– для аккумулятора 85 Ач серии Sonnenschein A512 (при $Q/Q_H = 10 \%$).

При этом относительная ошибка моделей в области частоты 5000 Гц составила величину порядка 14 % (рис. 4.19).

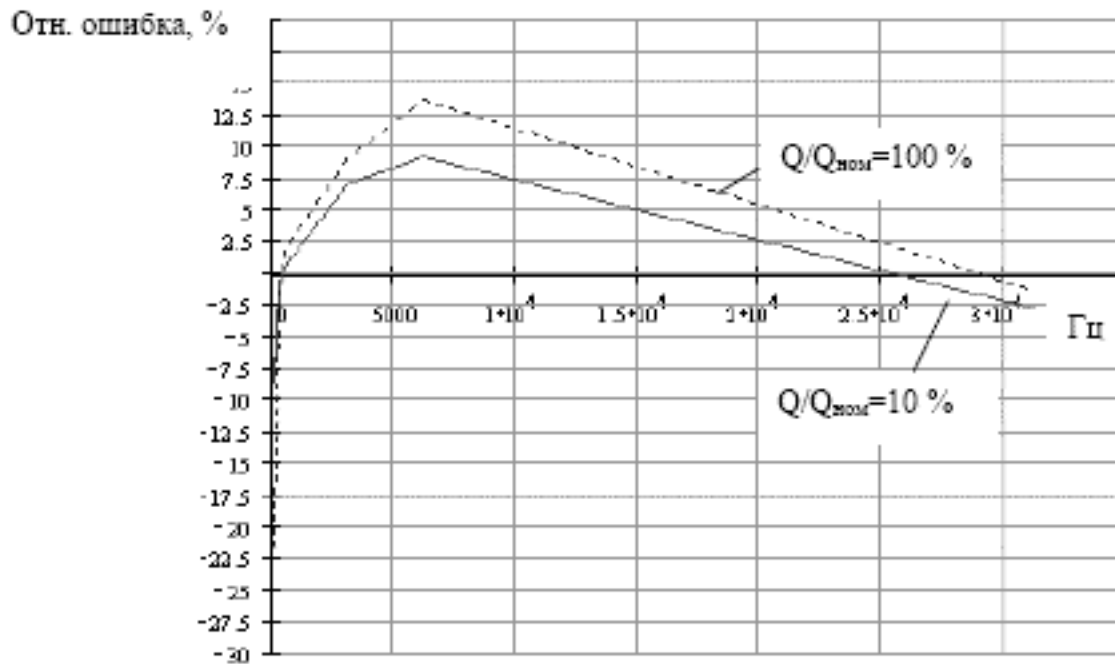


Рис. 4.19. Относительная ошибка, полученная при моделировании АЧХ АБ

Для уменьшения ошибки следует уточнить модель с учетом того, что на достаточно высоких частотах сопротивление АБ увеличивается пропорционально $\sqrt{\omega}$ (наклон АЧХ 10 дБ/дек) [95].

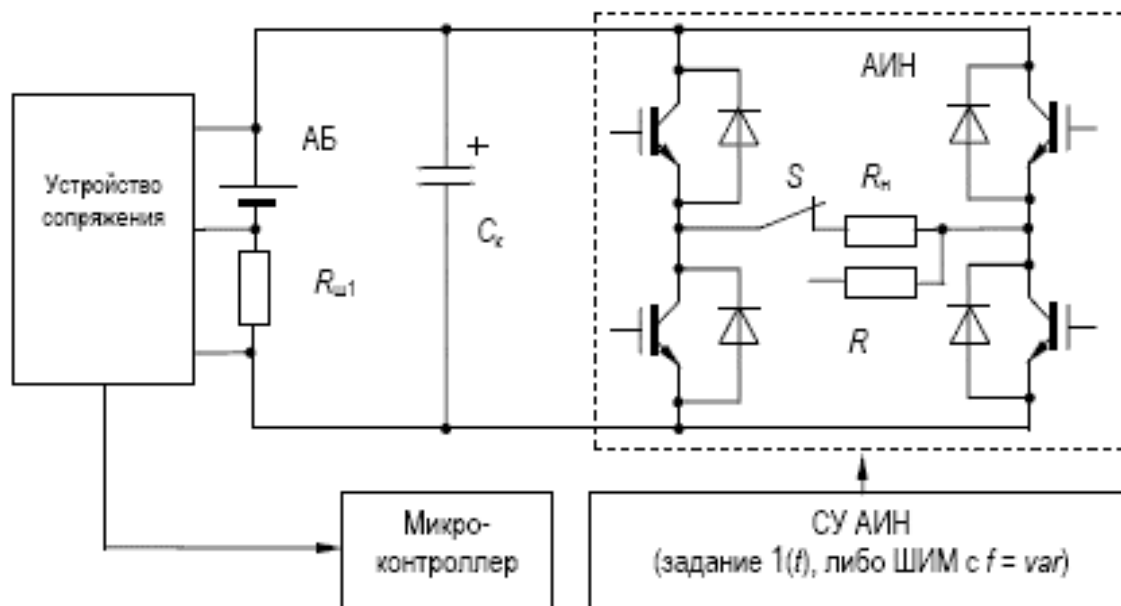


Рис. 4.20. Функциональная схема СБЭП переменного тока с использованием информативных свойств АИН для определения параметров и состояния АБ

На рис. 4.20 представлена функциональная схема СБЭП переменного тока, иллюстрирующая использование информативных свойств АИН для определения параметров и состояния АБ. Основная идея способа заключается в том, что АИН, являясь коммутатором, может подключать периодически нагрузку к АБ либо с заданным ступенчатым током, реализуя оперативное снятие переходных характеристик, либо с ШИМ по синусоидальному закону, реализуя оперативное снятие частотных характеристик. Во втором случае АБ нагружается синусоидальным током с двойной частотой выходного напряжения. При этом высокочастотная составляющая фильтруется компенсирующим конденсатором C_k , а в цепи АБ протекает синусоидальный ток. Тестирование АБ происходит при замыкании переключателя S и подключении активного нагрузочного резистора R .

В соответствии с вышеизложенными методиками микроконтроллер вычисляет полное, омическое и поляризационное сопротивления АБ, а также коэффициенты передаточной функции. Полученные данные сравниваются с эталонными, находящимися во flash-памяти контроллера. При работе на «штатную» нагрузку оперативное определение полного сопротивления АБ происходит на двойной частоте выходного напряжения АИН.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные требования, предъявляемые к ХИТ для СБЭП.
2. Назовите основные электрохимические системы ХИТ. Какие существуют методы заряда ХИТ?
3. Какие из ХИТ являются экологически наиболее чистыми? За счет чего?
4. Что такое зависимость Пейкерта?
5. Характеризуйте параметры схемы замещения ХИТ.
6. Как, используя переходные и частотные характеристики, определить параметры ХИТ?

Глава 5. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СБЭП В ЗАРЯДНЫХ И РАЗРЯДНЫХ РЕЖИМАХ АБ

Рассмотрение динамических характеристик СБЭП проведем для двух режимов, при которых:

- 1) потребитель получает напряжение от сети, а АБ находится в режиме заряда или «буфера» («зарядный режим»);
- 2) потребитель получает напряжение через АИН СБЭП от АБ, находящейся в режиме разряда («инверторный режим»).

При этом динамические характеристики СБЭП при переходе с режима (1) на режим (2) и наоборот фактически определяются реакцией на возмущающее воздействие в начальный момент наступающего режима. Для синтеза регуляторов инверторного и зарядного режимов СБЭП авторами использовался метод ВИМ [79, 103], для анализа — пакет *Matlab 6.0 — Simulink 4*.

Современные СБЭП содержат элементы, параметры которых могут меняться как во времени (из-за изменения режимов работы, старения, частичного выхода из строя элементов, не приводящего к аварийным режимам системы), так и при замене элементов при ремонтных работах. Это делает необходимым их периодическую настройку на оптимальный режим по принятому в конкретных условиях критерию. Настройка системы может осуществляться при регламентных работах или автоматически, непосредственно на работающей системе. Наибольший интерес представляет собой последний вариант, который свободен от субъективных погрешностей. Однако реализация режимов самонастройки таких систем в настоящее время является сложной научно-технической задачей.

Наиболее эффективным способом самонастройки считают идентификационный. Он включает в себя два этапа [104]. На первом осуществляется периодическая идентификация той части системы, параметры элементов которой оказываются переменными. На втором этапе производится собственно самонастройка системы, которая сводится к направленному изменению параметров регулятора в соответствии с принятым критерием настройки.

Существенной частью второго этапа является поиск таких решений, при которых настраиваемая система будет робастной, т. е. малые изменения параметров элементов системы будут приводить к достаточно малым изменениям параметров самой системы. Свойство робастности придает системе естественные свойства адаптации и повышает надежность ее работы. К сожалению, в настоящее время отсутствуют методы, в полной мере отвечающие условиям рассматриваемой задачи. Это объясняется тем, что разработанные методы ориентированы, как правило, на анализ робастности синтезированных систем [108]. Между тем практические задачи требуют учета робастности уже на этапе синтеза. С этой точки зрения привлекательным является ВИМ, который позволяет учесть требования робастности при синтезе систем, а также при их самонастройке [103].

Основы математического аппарата ВИМ [103] были изложены в гл. 4, где он был использован для решения задачи идентификации параметров АБ как элемента СБЭП с наиболее меняющимися во времени параметрами. Это фактически соответствует содержанию первого этапа автоматической настройки системы — идентификации. Далее рассмотрим возможность использования ВИМ для реализации второго этапа — определения параметров регулятора настраиваемой системы.

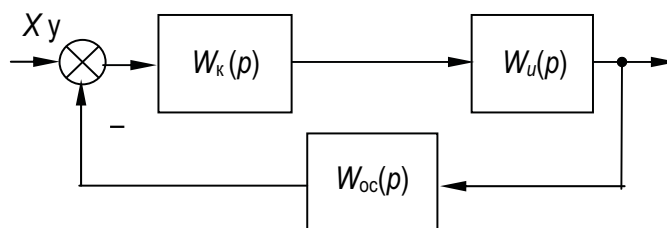


Рис. 5.1. Обобщенная структурная схема СБЭП

Рассмотренные выше СБЭП можно представить в виде САУ, приведенной на рис. 5.1. В этом случае задача настройки регулятора сводится к решению уравнения

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{W_{\text{к}}(p)W_{\text{и}}(p)}{1 + W_{\text{к}}(p)W_{\text{и}}(p)K_{\text{ос}}}, \quad (5.1)$$

где $W_{\text{ж}}(p)$, $W_{\text{к}}(p)$, $W_{\text{и}}(p)$ — ПФ, соответственно, желаемой (эталонной) замкнутой системы, корректирующего устройства (регулятора) и неизменяемой части САУ; $W_{\text{ос}}(p)$ — ПФ блока обратной связи.

В техническом отношении более выгодно использовать уравнение синтеза разомкнутой системы. В случае единичной обратной связи оно принимает вид

$$W_{\text{ж}}^{\text{р}}(p) = W_{\text{к}}(p)W_{\text{и}}(p). \quad (5.2)$$

На практике уравнение (5.2) не имеет точного решения из-за несогласованности входящих в него ПФ. Действительно, неизменяемая часть системы, описываемая ПФ $W_{\text{и}}(p)$, определена параметрами объекта управления, например постоянными времени АБ, которые не могут быть изменены в процессе настройки системы. В свою очередь, желаемая ПФ формируется по требуемым показателям точности и качества, предъявляемым к системе. Наконец, последняя ПФ $W_{\text{к}}(p)$ — задана с точностью до настраиваемых коэффициентов. Это свидетельствует о том, что в общем случае точное совпадение характеристик эталонной и синтезированной систем невозможно. Тогда уравнение (5.2) должно быть приближенным:

$$W_{\text{ж}}^{\text{р}}(p) \cong W_{\text{к}}(p)W_{\text{и}}(p). \quad (5.3)$$

Для отыскания его решения можно воспользоваться возможностями ВИМ, позволяющего развернуть уравнение (5.3) в систему η линейных алгебраических уравнений.

Пусть по условиям задачи ПФ корректирующего устройства

$$W_{\text{к}}(p) = \frac{b_{km}p^m + b_{km-1}p^{m-1} + \dots + b_{k0}}{p^v(a_{kn}p^n + a_{kn-1}p^{n-1} + \dots + 1)}, \quad m \leq n, \quad n = 0, 1, \dots \quad (5.4)$$

известна с точностью до коэффициентов $a_{kn}, a_{kn-1}, \dots, a_{k1}, b_{km}, b_{km-1}, \dots, b_{k1}, b_{k0}$, которые подлежат определению. Передаточная функция неизменяемой части $W_{\text{и}}(p)$ известна. Желаемая ПФ разомкнутой системы может быть найдена любым известным методом, например методом Орурка [109]. В этом случае исходными данными для ее определения будут служить прямые показатели качества настраиваемой системы — перерегулирование δ и время регулирования (длительность переходного процесса) $t_{\text{р}}$. Первый из этих показателей обычно известен по технологическим особенностям применения СБЭП. Второй показатель также обычно известен, однако в большинстве случаев справедлива весьма общая рекомендация: значение $t_{\text{р}}$ не является критичным, но желательно иметь его минимальным. В последнем случае величину $t_{\text{р}}$ можно приближенно оценить по ПФ неизменяемой части. Далее можно найти ПФ разомкнутой системы, так что в уравнении (5.3) остается неизвестной лишь ПФ $W_{\text{к}}(p)$.

Уравнение (5.3) при выполнении определенных условий [103] можно заменить эквивалентным ему уравнением в терминах вещественных функций:

$$W_{\text{ж}}^{\text{р}}(\delta) \cong W_{\text{к}}(\delta)W_{\text{и}}(\delta). \quad (5.5)$$

Уравнение (5.5) допускает простое по технике преобразование в систему $\eta = m + n + 1$ линейных алгебраических уравнений относительно $m+n+1$ неизвестных коэффициентов функции (5.4). Для получения такой системы требуют совпадения левой и правой частей уравнения (5.5) в узлах δ_i сетки $\Delta_\eta = \{C \leq \delta_1 < \delta_2 < \dots < \delta_\eta < \infty\}$. Процедура может рассматриваться как приближение функции, синтезируемой функцией

$$W_c^p(\delta) = \frac{b_{km}\delta^m + b_{km-1}\delta^{m-1} + \dots + b_{k0}}{\delta^v(a_{kn}\delta^n + a_{kn-1}\delta^{n-1} + \dots + 1)} W_u(\delta),$$

такой, что

$$W_{\text{ж}}^p(\delta_i) = W_{\text{к}}(\delta_i) W_u(\delta_i), \quad i = \overline{1, \eta}. \quad (5.6)$$

Последнее соотношение удобно записать в терминах численных характеристик:

$$\{W_{\text{ж}}^p(\delta_i)\}_\eta = \{W_{\text{к}}(\delta_i)\}_\eta \cdot \{W_u(\delta_i)\}_\eta. \quad (5.7)$$

Отсюда можно найти характеристику корректирующего устройства,

$$\{W_{\text{к}}(\delta_i)\}_\eta = \{W_{\text{ж}}^p(\delta_i)\}_\eta / \{W_u(\delta_i)\}_\eta, \quad (5.8)$$

и составить СЛАУ,

$$W_{\text{к}}(\delta_i) = \frac{b_{km}\delta_i^m + b_{km-1}\delta_i^{m-1} + \dots + b_{k0}}{\delta_i^v(a_{kn}\delta_i^n + a_{kn-1}\delta_i^{n-1} + \dots + 1)}, \quad i = \overline{1, \eta}. \quad (5.9)$$

Полученные в результате решения системы уравнения (5.9) значения коэффициентов полностью определяют передаточные функции корректирующего устройства $W_{\text{к}}(p)$ и замкнутой синтезированной системы $W_c(p)$.

Таким образом, предположение о возможности использования ВИМ в задачах настройки СБЭП имеет свое подтверждение. Кроме того, рассмотренный подход обладает механизмом обеспечения требуемых свойств робастности на этапе настройки регулятора [108]. В практических задачах это обстоятельство может оказаться решающим при выборе того или иного метода настройки системы.

Для пояснения изложенного в качестве примера рассмотрим синтез СБЭП типа ПОС-10000М АЛТ3.211.211М, структурная схема которой представлена на рис. 5.2.

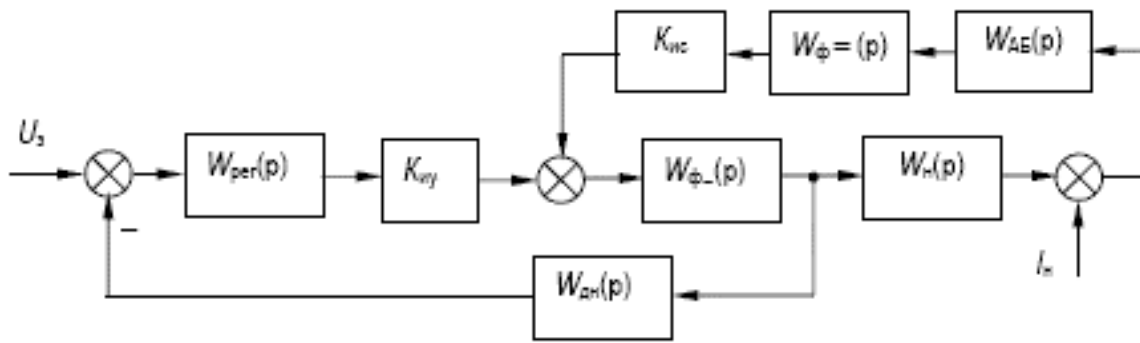


Рис. 5.2. Структурная схема СБЭП ПОС-10000М АЛТ3.211.211М

Элементы схемы, рассмотренные в главе 3, имеют следующие параметры и ПФ:

- 1) коэффициент усиления АИН по управлению $K_{uy} = 46$;
- 2) ПФ выходного Г-образного фильтра АИН $W_{ф-}(p) = \frac{1}{T_{ф-2}p^2 + T_{ф-1}p + 1}$,
при $T_{ф-2} = 10^{-7}$ с, $T_{ф-1} = 5 \cdot 10^{-5}$ с;
- 3) ПФ нагрузки $W_{н}(p) = \frac{1}{R_{н}}$, при $R_{н} = (10 \div 100)$ Ом;
- 4) ПФ АБ $W_{аб}(p) = \frac{K_6(T_6p + 1)}{T_{п}p + 1}$, $T_6 = 0,436$ с, $T_{п} = 0,006$, $K_6 = 0,014$;
- 5) ПФ фильтра в звене постоянного тока АИН, образованного компенсирующим конденсатором и сопротивлением аккумуляторного кабеля $W_{ф=}(p) = \frac{1}{T_{ф=1}p + 1}$, $T_{ф=1} = 10^{-2}$ с;
- 6) коэффициент передачи АИН по силовой цепи $K_{ис} = 1$;
- 7) ПФ датчика напряжения $W_{дн}(p) = K_{ос} = 0,035$.

Тогда, в соответствии со схемой (рис. 5.2) ПФ неизменяемая часть системы будет иметь вид (при $R_{н} = 55$ Ом):

$$\begin{aligned}
W_{\text{неиз.}}(p) &= \frac{K_{uy} [T_{\pi} T_{\phi} p^2 + (T_{\pi} + T_{\phi}) \cdot p + 1]}{T_{\pi} T_{\phi} = T_{\phi \sim 2} \cdot p^4 + (T_{\phi \sim 2} T_{\pi} + T_{\phi} = T_{\phi \sim 2} + T_{\pi} T_{\phi} = T_{\phi \sim 1}) \cdot p^3 +} \\
&+ (T_{\phi \sim 2} + T_{\phi \sim 1} T_{\pi} + T_{\phi} = T_{\phi \sim 1} + T_{\pi} T_{\phi} =) \cdot p^2 + \\
&\frac{(T_{\phi \sim 2} + T_{\pi} + T_{\phi} - \frac{T_6}{K_6 R_H}) \cdot p + (1 - \frac{1}{K_6 R_H})}{=} \\
&= \frac{b_{H2} p^2 + b_{H1} p + b_{H0}}{a_{H4} p^4 + a_{H3} p^3 + a_{H2} p^2 + a_{H1} p + 1} = \\
&= \frac{276 \cdot 10^{-5} p^2 + 736 \cdot 10^{-3} p + 46,012}{6 \cdot 10^{-12} p^4 + 22 \cdot 10^{-10} p^3 + 60 \cdot 10^{-14} p^2 + 16 \cdot 10^{-15} p + 1}.
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Переходная характеристика, соответствующая ПФ, представлена на рис. 5.3.

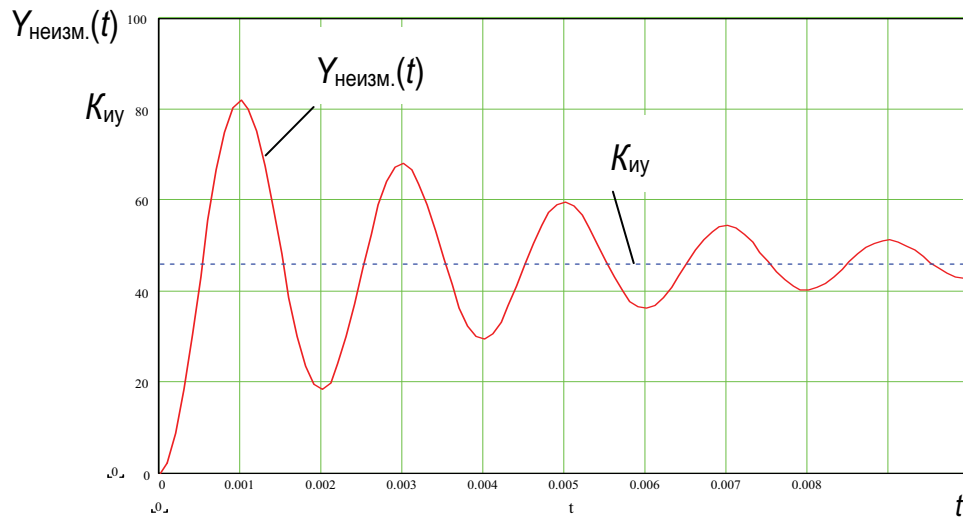


Рис. 5.3. Переходная характеристика неизменяемой части системы

Необходимо определить параметры регулятора, обеспечивающие в синтезированной САУ следующие показатели:

1) перерегулирование 10 %; 2) время регулирования 10 мс.

Решение будем искать в виде передаточной функции ПИД-регулятора:

$$\begin{aligned}
W_k(p) &= K_{\pi} + \frac{1}{T_{\pi} p} + \frac{K_d p}{T_d p + 1} = \frac{K_{\pi} T_d p^2 + (K_{\pi} + \frac{T_d}{T_{\pi}} + K_d) p + \frac{1}{T_{\pi}}}{p(T_d p + 1)} = \\
&= \frac{b_{k2} p^2 + b_{k1} p + b_{k0}}{p(a_{k1} p + 1)}.
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Воспользовавшись методом Огурка [109], найдем желаемую ПФ разомкнутой системы:

$$W_{\text{ж}}^p(p) = \frac{b_{\text{ж}1}p + b_{\text{ж}0}}{p(a_{\text{ж}1}p + 1)} = \frac{28,57p + 2,05 \cdot 10^4}{p(3,33 \cdot 10^{-3}p + 1)}, \quad (5.12)$$

которая в замкнутом состоянии обеспечивает заданные показатели $\sigma, t_p^{\text{ж}}$ (см. рис. 5.4).

Найденная ПФ позволяет сформировать уравнение синтеза:

$$\begin{aligned} \frac{28,57p + 2,05 \cdot 10^4}{p(3,33 \cdot 10^{-3}p + 1)} &= \frac{b_{k2}p^2 + b_{k1}p + b_{k0}}{p(a_{k1}p + 1)} \times \\ &\times \frac{276 \cdot 10^{-5}p^2 + 736 \cdot 10^{-3}p + 46,012}{6 \cdot 10^{-12}p^4 + 22 \cdot 10^{-10}p^3 + 60 \cdot 10^{-14}p^2 + 16 \cdot 10^{-15}p + 1}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

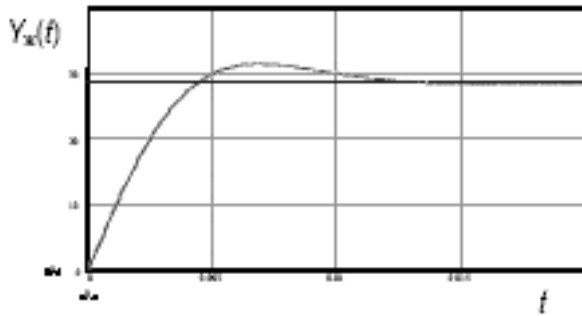


Рис. 5.4. Желаемая переходная характеристика системы

Коэффициент b_{k0} в ПФ $W_k(\delta)$ найдем из уравнения статики $b_{k0} = b_{\text{ж}0} / b_{\text{н}0} = 446,26$. Неизвестными остаются коэффициенты b_{k2}, b_{k1} и a_{k1} . Для их определения зададим значения узлов $\delta_1 = 2000; \delta_2 = 4000, \delta_3 = 6000$, составим СЛАУ и, решая ее, получим искомые коэффициенты ПФ регулятора: $b_{k2} = 7,15 \cdot 10^{-5}, b_{k1} = -0,129, a_{k1} = 2,09 \cdot 10^{-4}$. Найденное решение обеспечивает в синтезированной САУ перерегулирование $\sigma \approx 8 \%$ и время регулирования $t_p \approx 0,006$ с, т. е. (рис. 5.5) удовлетворяет исходным требованиям.

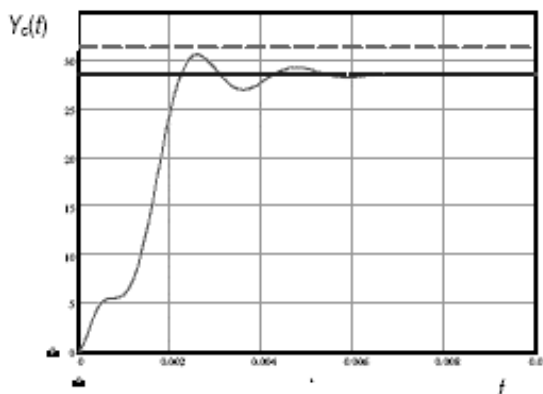


Рис. 5.5. Переходная характеристика синтезированной системы

При решении задачи определения параметров ПФ регулятора $W_k(p)$ на основе ВИМ система высокого порядка с ПФ $W_{ж}^p(p) = W_k(p) W_n(p)$ была представлена в виде ПФ $W_{ж}^p(p)$ низкого порядка. Это допущение может привести к тому, что после проведения расчетов можно не получить требуемого решения. Для поиска удовлетворительного решения ВИМ обладает необходимым инструментарием — узлами интерполирования $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$. Их изменение в соответствии с определенным алгоритмом [110] позволяет в большинстве случаев достигать требуемых показателей качества в системе. Однако может возникнуть ситуация, когда любое изменение узлов интерполирования не приведет к необходимому результату. Такого рода опасность существует, когда к синтезируемой системе предъявляются жесткие требования. Например, заданное значение t_p^* может оказаться настолько малым, что инерционные свойства объекта управления ни при каких условиях не позволят получить требуемое решение. Для выхода из сложившейся ситуации в общем случае возможны два пути. Первый заключается в параметрическом изменении ПФ $W_{ж}(p)$ за счет ослабления требований к одному или нескольким заданным показателям качества. Такое ослабление позволяет найти новые значения коэффициентов $b_{jr}, a_{jj}, r = \overline{0, m}, j = \overline{1, n}$ передаточной функции эталонной системы и вновь вернуться к решению задачи синтеза регулятора с использованием изменения узлов интерполирования $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$. Второй путь получения требуемой настройки регулятора основан на изменении структуры ПФ $W_k(p)$, точнее, на увеличении полиномов числителя и/или знаменателя ПФ. Это позволяет уменьшить несоответствие передаточных функций, входящих в уравнение синтеза (5.3). Отметим, что этот путь оказывается единственно возможным, если по условиям задачи нельзя изменять показатели σ_3 и t_p^* .

Таким образом, рассмотренный подход в решении задачи настройки динамики СБЭП на основе ВИМ позволяет обеспечивать в системе требуемые показатели качества и обладает для этого достаточными средствами.

Рассмотрим задачу робастной настройки регулятора на основе ВИМ.

Формально задачу настройки регулятора на основе ВИМ можно разбить на два этапа. Первый состоит в решении уравнения (5.3) и выполняется согласно методике и алгоритмам, рассмотренным в [110].

Решений, подобных найденному на первом этапе, может быть получено сколь угодно много, если использовать различные системы узлов $\{\delta_i\}_\eta$. Поэтому второй этап настройки системы направлен на выбор таких значений $\delta_i, i = \overline{1, \eta}$, которые позволяют получать функции $W_c(p)$, обеспечивающие устойчивость или минимально-фазовость системы, соответствие заданным показателям качества и требованиям по робастности.

Для выбора единственного решения в [110] был сформирован и использован критерий, определяющий достижение в синтезируемой системе заданного перерегулирования σ_3 , значение которого для большинства СБЭП является определяющим. Предложенный способ синтеза систем на основе такого критерия обеспечивает достижение цели и показал удовлетворительные результаты при решении разнообразных задач синтеза.

Однако в некоторых случаях синтезируемые системы не обладают свойством робастности относительно принятого критерия. Это проявляется в том, что достигнутое приближенное равенство $\sigma \approx \sigma_3$ легко нарушается при изменении некоторых коэффициентов ПФ объекта управления или корректирующего устройства (регулятора). При этом ошибка $\Delta\sigma = \sigma_3 - \sigma$ становится недопустимо большой даже при малых изменениях указанных коэффициентов. Это свидетельствует о том, что при настройке СБЭП должны быть не только достигнуты заданные значения показателей качества, но и необходимо выполнить требования по робастности. Для синтеза регуляторов низкого порядка в настоящее время теоретические решения не найдены [111]. Поэтому на первый план выступают итерационные процедуры на базе численных методов. В [112] предложен двухэтапный метод решения задачи, каждый этап которого реализуется итерационным путем.

Идея предложенного метода состоит в последовательном двухэтапном приближении к искомому решению. На первом этапе по методике, изложенной ранее, обеспечивается достижение заданного значения перерегулирования, на втором — оцениваются и изменяются до необходимого уровня робастные свойства системы. В техническом отношении двухэтапная последовательность состоит в том, что на первом этапе выделяется область решений, удовлетворяющих требованиям по показателям качества, на втором — выделяется подобласть решений, для которых выполняются требования по робастности.

В табл. 5.1 приведены сводные данные по синтезу регулятора, обеспечивающего в рассмотренной выше СБЭП требуемые показатели качества и при изменении параметров системы в определенных пределах (табл. 5.2).

Таблица 5.1

Данные расчета регулятора по заданным показателям качества

Параметры регулятора				Показатели качества настраиваемой системы	
K_P	T_I	K_D	T_D	$\sigma_3, \%$	t_p, c
0,012	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-9}$	8	0,012

Таблица 5.2

Пределы варьирования параметров системы

T_6	K_6	T_{Π}	R_H	$K_{иу}$	$T_{\phi \sim 2}$	$T_{\phi:1}$	$T_{\phi=}$
0...20	2... ∞	0... ∞	2... ∞	20...50	0... $1,05 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^{-5}$... $1,6 \cdot 10^{-3}$	0... ∞

На рис. 5.6, 5.7 представлены структурные схемы для анализа динамических характеристик СБЭП в среде *Matlab 6.0 – Simulink 4*, соответственно, в инверторном режиме и в режиме заряда (на примере СБЭП ПОС-10000 3.211.211 и ПОС-4000 АЛТ3.211.202, НИИ автоматики и электромеханики, г. Томск). Результаты анализа иллюстрируют рис. 5.8, 5.9.

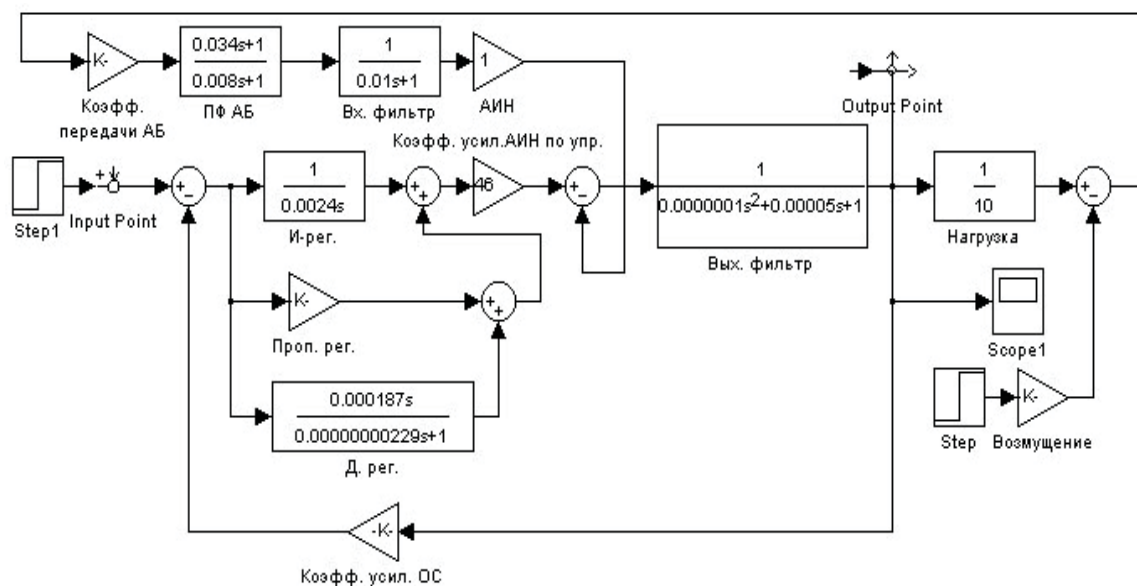


Рис. 5.6. Структурная схема СБЭП ПОС-10000 АЛТ3.211.211 в инверторном режиме

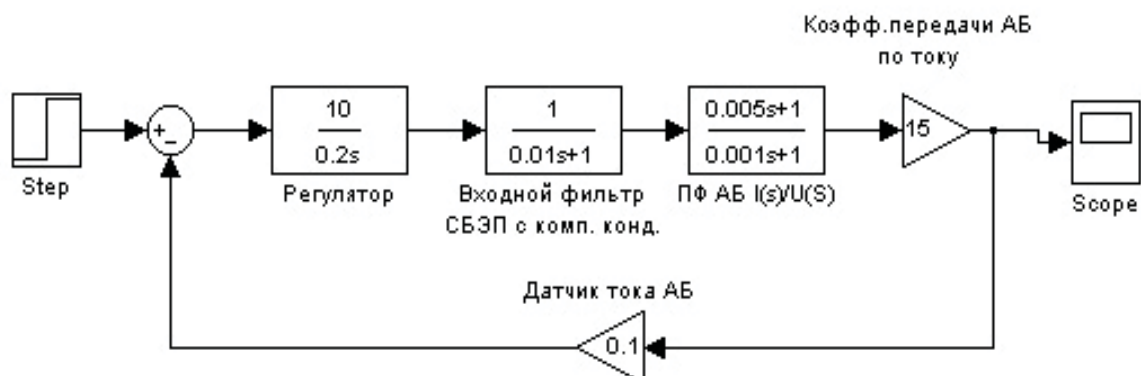


Рис. 5.7. Структурная схема СБЭП ПОС-4000 АЛТ3.211.202 в режиме заряда АБ при стабилизации тока

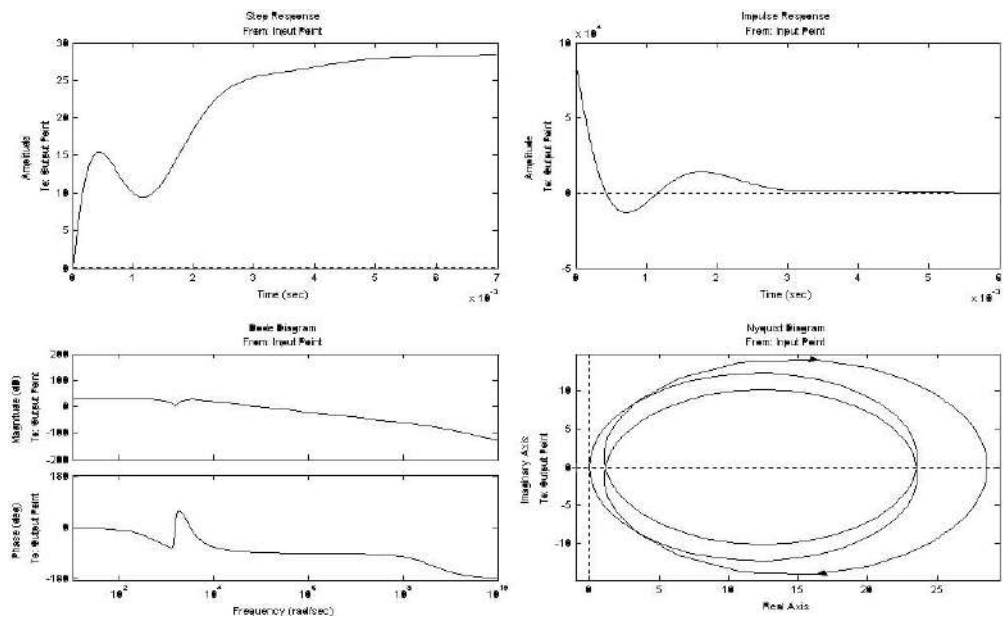


Рис. 5.8. Результаты анализа динамических характеристик для СБЭП ПОС-10000 АЛТ3.211.211 в инверторном режиме

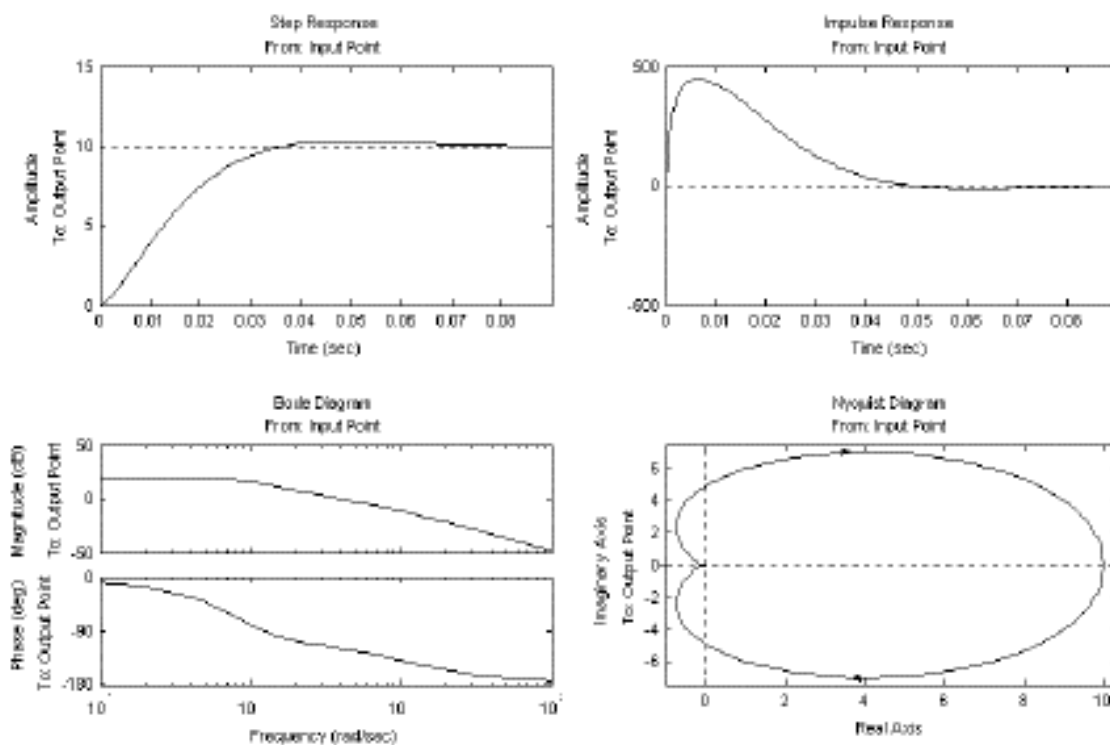


Рис. 5.9. Результаты анализа динамических характеристик для СБЭП ПОС-4000 АЛТ3.211.202 в режиме заряда АБ со стабилизацией тока

В заключение рассмотрим работу СБЭП на сложную нелинейную нагрузку, изменяющуюся в широких пределах. Примером подобной нагрузки является выпрямитель с емкостным фильтром, являющийся

необходимым атрибутом большинства источников питания современной аппаратуры.

Особенностью работы СБЭП на выпрямитель с фильтром является искажение формы выходного напряжения за счет того, что к выходному фильтру периодически подключается фильтрующий конденсатор выпрямителя (рис. 5.10). При этом нагрузка инвертора изменяется от нуля до номинального значения, а дроссель выходного фильтра при импульсном характере тока должен обеспечить возможность заряда сглаживающего конденсатора выпрямителя при сохранении заданного качества выходного напряжения. Как показывает практика, при колебательном характере переходного процесса это довольно затруднительно.

При больших значениях сглаживающих емкостей реальных выпрямителей выходное напряжение СБЭП сильно искажается (рис. 5.11).

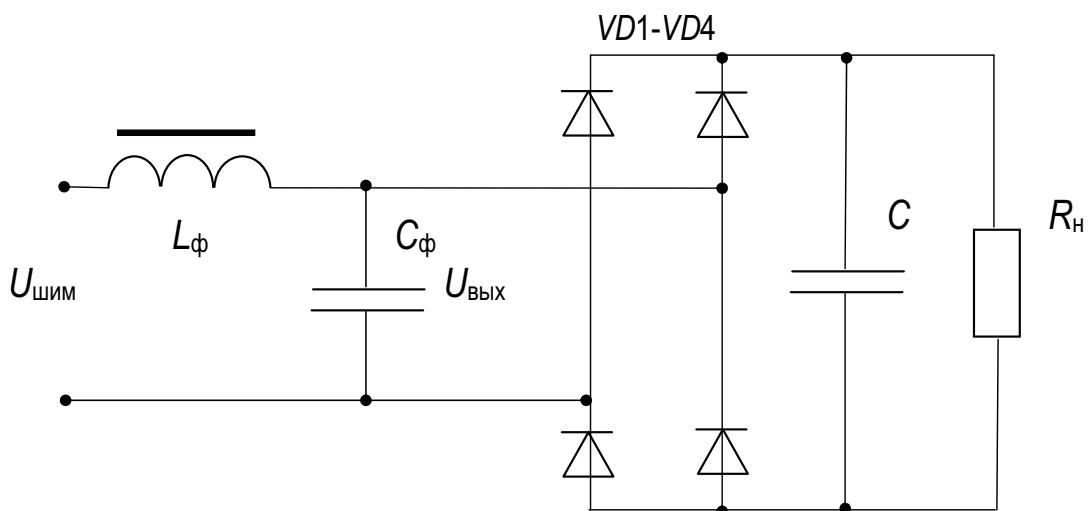


Рис. 5.10. Г-образный выходной фильтр АИН при работе на выпрямительный мост

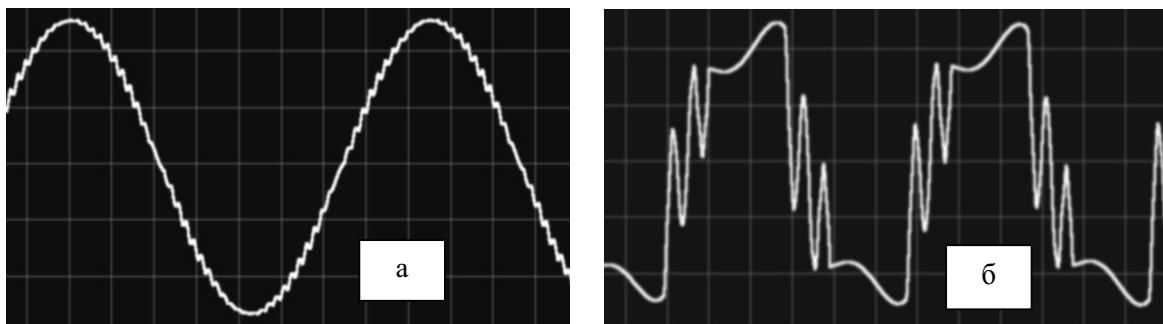


Рис. 5.11. Выходное напряжение СБЭП с ШИМ при работе: а — на активную нагрузку; б — диодный мост со сглаживающим конденсатором в 300 мкФ

В этом случае необходимо уменьшать индуктивность выходного фильтра, что, в свою очередь, загружает АИН емкостным током. Снять вышеизложенные противоречия можно введением в СБЭП главной обратной связи по мгновенному значению входного напряжения. Современные быстродействующие транзисторные IGBT-ключи позволяют строить АИН с частотой коммутации, составляющей десятки кГц. Это позволяет считать АИН безынерционным линейным звеном при существенном снижении габаритов выходного фильтра. Фактически такой инвертор в СБЭП работает в релейном режиме при частоте работы ключей, изменяющейся в зависимости от режима энергопотребления. При этом к нагрузке он оказывается инвариантен. На рис. 5.12, 5.13 представлены осциллограммы, поясняющие процесс формирования выходного напряжения АИН с ШИМ при организации обратной связи по мгновенному значению выходного напряжения.

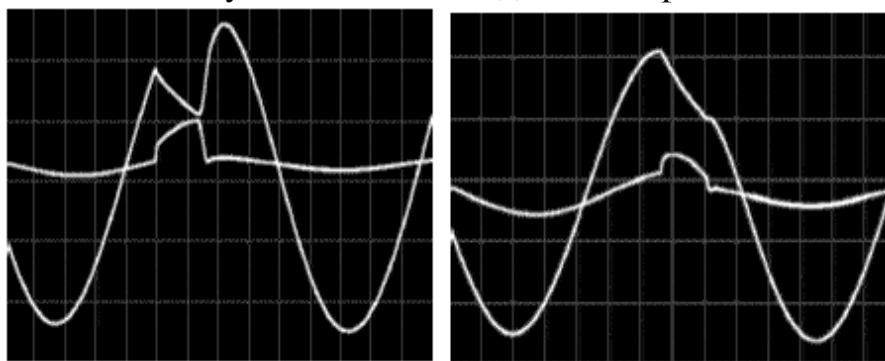


Рис. 5.12. Осциллограммы напряжения на нагрузке и сигнала обратной связи при переходе СБЭП с промышленной сети на инвертор в различные моменты времени

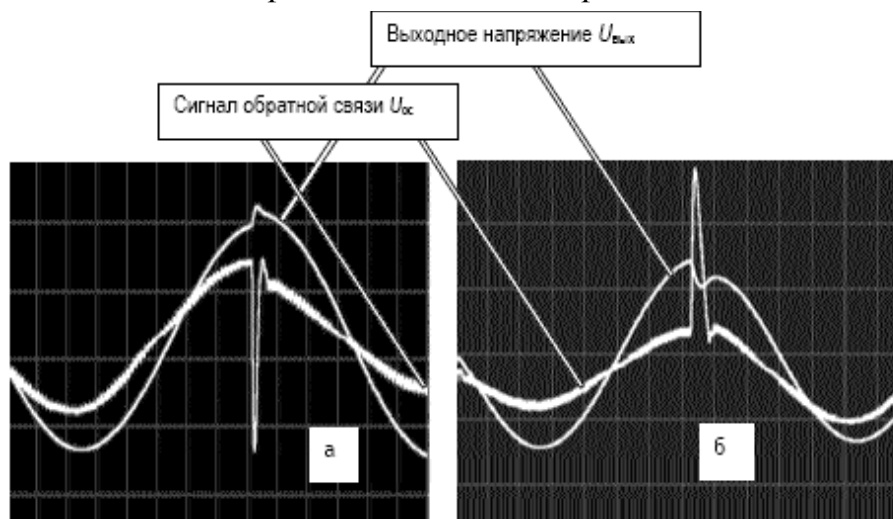


Рис. 5.13. Осциллограммы изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ СБЭП при сбросе (а) и набросе (б) нагрузки в диапазоне «холостой ход — номинальный режим» и сигналы обратной связи U_{oc}

Контрольные вопросы

1. Запишите передаточную функцию ХИТ, исходя из его схемы замещения.
2. За счет чего может происходить искажение формы выходного напряжения АИН, работающего на выпрямитель с фильтром?
3. Какой тип обратной связи делает систему «АИН с ШИМ-фильтр» инвариантной к нагрузке с точки зрения качества выходного напряжения?

Глава 6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ СТАНЦИЕЙ

Для повышения надежности функционирования ответственных потребителей предприятий построение системы аварийного электроснабжения должно включать в себя дизель-генераторную станцию (ДГС) и статическую СБЭП переменного тока. Согласно представленной схеме (рис. 6.1), в штатном режиме электроснабжение потребителей происходит от промышленной сети. При этом СБЭП постоянно осуществляет слежение за сетью, корректирует отклонения напряжения для ответственных потребителей от нормы, производит фильтрацию импульсных помех, осуществляет тестирование и подзаряд до максимальной емкости собственных АБ.

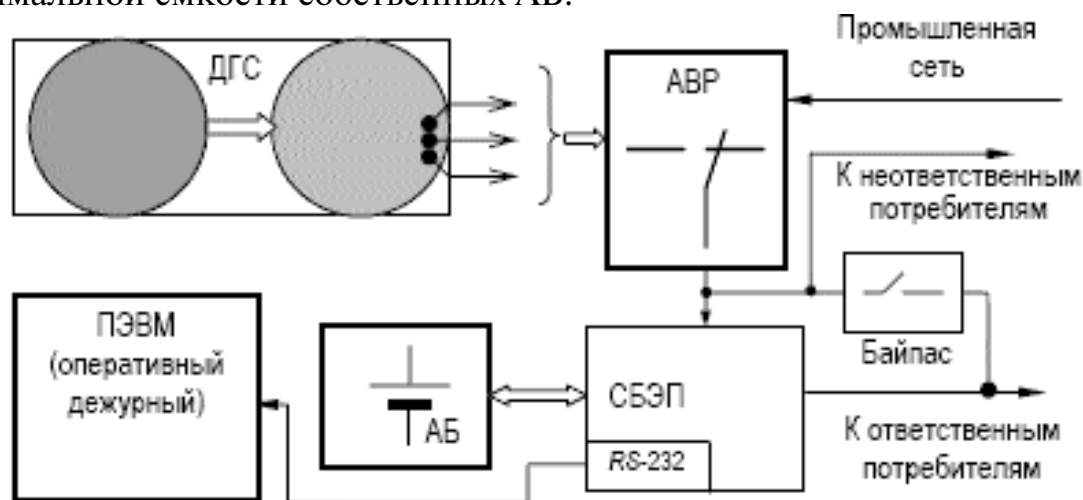


Рис. 6.1. Структурное построение систем аварийного электроснабжения предприятия с ДГС и СБЭП

В случае чрезмерного отклонения или исчезновения напряжения в городской сети СБЭП типа *off-line* безобрывно переводит на себя питание потребителей. Через некоторое заданное время, необходимое для запуска и выхода на режим ДГС, или в случае критического разряда АБ, начинается резервное электроснабжение от ДГС. Совершенно очевидно, что при кратковременных перерывах (до нескольких минут) в промышленных сетях нецелесообразно производить запуск ДГС, так как емкости встроенных АБ вполне достаточно, чтобы обеспечить электро-

питание всех потребителей от СБЭП. При хорошем качестве напряжения станции СБЭП автоматически синхронизируется с ДГС и безобрывно передает ей ответственных потребителей. Момент синхронного перехода потребителей со СБЭП на ДГС (как и запуск ДГС) может происходить и по сигналу встроенного в СБЭП микроконтроллера после определенной выработки емкости АБ, которая может длиться часами. Таким образом, можно минимизировать число запусков и остановок ДГС, что продлевает срок службы станции. На информационном табло СБЭП отражается текущая информация о режимах работы, остаточной емкости АБ и резерве времени (параллельно аналогичная информация может передаваться через порт RS-232 на экран ПЭВМ оперативного дежурного). При появлении напряжения промышленной электросети начинается обратный автоматический перевод потребителей со СБЭП (ДГС) на сеть. В случае если потребители работали от ДГС, перевод осуществляется в два этапа: сначала при отключении ДГС СБЭП безобрывно переводит всех потребителей на себя, а затем, после синхронизации, так же безобрывно отдает их промышленной сети. Обводной ключ «байпас» служит для непосредственного безобрывного присоединения потребителей к промышленной сети при проведении регламентных или ремонтных работ с системой. Таким образом, статическая СБЭП, находясь постоянно в дежурном режиме, выполняет не только роль автономного источника аварийного электроснабжения, но и при схеме *off-line* является своеобразным инструментом для синхронного и безобрывного перевода ответственных потребителей с основной сети на резервную (ДГС) и наоборот. Принципиально подобная система может быть использована и при наличии двух сетей. При этом СБЭП следит за обеими сетями и в случае необходимости (авария, регламентные работы) производит синхронную коммутацию потребителя с одной сети на другую. При длительном отсутствии напряжения обеих сетей, электроснабжение осуществляется от АБ, при дальнейшей передаче потребителя ДГС.

На характер взаимодействия СБЭП и ДГС влияет целый ряд факторов, связанных, прежде всего, с принципом действия ДГС и СБЭП.

В качестве источника электрической энергии в ДГС используется синхронный генератор. При этом предполагается использование контуров регулирования по выходному напряжению и частоте, следовательно речь идет о постоянных времени этих контуров. В свою очередь, у СБЭП также присутствуют главная обратная связь по выходному напряжению и система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Пере-

ключение СБЭП на ДГС аналогичной мощности приводит к переходным процессам, в частности к провалу напряжения синхронного генератора, которое в процессе отработки контуром обратной связи генератора может быть воспринято датчиками напряжения СБЭП как выход внешней сети за пределы нормы. Несмотря на то что регуляторы напряжения ДГС дают стабилизацию напряжения в установившемся режиме $\pm 0,5$ или $\pm 1,5$ %, при подключении нагрузки неизбежные «пропадки» составляют 15–20 % от номинального напряжения. В результате у неправильно взаимно подобранных по мощности и постоянным времени контуров ДГС и СБЭП может возникнуть автоколебательный режим чередования переключения потребителя с ДГС на СБЭП и т. д.

Считается, что параметры переходного процесса при набросе нагрузки у дизелей с газотурбинным наддувом ниже, чем у дизелей без него, что делает их применение в составе ДГС не всегда целесообразным, особенно при «мгновенных» или «резких» набросах нагрузки [113]. Способность такого дизеля к приему мгновенно набрасываемой нагрузки зависит, главным образом, от времени разгона и производительности турбонагнетателя. При наличии регулятора частоты вращения, работающего в функции давления наддувочного воздуха при набросе нагрузки, снижается частота вращения и регулятор ДГС переставляет рейку топливных насосов высокого давления (ТНДВ) в положение максимально возможной подачи топлива. Применение любых регуляторов частоты вращения, изменяющих подачу топлива, на двигателях с высоким наддувом может улучшить качество переходного процесса только незначительно (за счет сокращения времени перестановки рейки ТНДВ в положение максимально допустимой подачи топлива).

Иначе обстоит дело на двигателях с нагнетателями (компрессорами), имеющими механический привод. У них количество поступающего на горение воздуха зависит только от частоты вращения вала дизеля и производительности компрессора, т. е. практически остается неизменным на всех режимах работы ДГС. Это позволяет за счет улучшения характеристик регулятора частоты вращения (уменьшением запаздывания и увеличением скорости отработки) существенно повысить динамические показатели систем регулирования таких дизелей. Следует только иметь в виду, что при установке на двигатели электронных регуляторов особое внимание нужно обращать на выбор типа исполнительных механизмов, неудачный выбор которых (недостаточное быстроедействие) может свести к нулю все преимущества таких регуляторов [113].

Наблюдаемое в момент подключения СБЭП снижение напряжения вызывается недостаточными возможностями используемых возбудителей, которые для условий работы в системе «ДГС—СБЭП» должны обладать большим пределом форсировки возбуждения.

ДГС, согласно ГОСТ 13822-82 «Электроагрегаты и передвижные электростанции, дизельные. Общие технические условия (с изменениями 1989 г.)», должны эксплуатироваться с нагрузкой, коэффициент мощности которой не должен быть меньше значения 0,8. При этом характер нагрузки должен быть индуктивным.

Следующая особенность взаимодействия СБЭП и ДГС вытекает из особенностей работы синхронного генератора на различные виды нагрузок. Если генератор работает на активно-индуктивную нагрузку, то, кроме падения напряжения на его внутреннем сопротивлении, возникает еще и так называемая размагничивающая реакция якоря, приводящая к еще большему падению напряжения. При работе на активно-емкостную (или чисто емкостную) нагрузку возникает намагничивающая реакция якоря, приводящая к повышению напряжения на выходе генератора. При этом работа на емкостную нагрузку является крайне нежелательной или даже недопустимой. Однако, как следует из описания принципов формирования напряжения в СБЭП различных топологий, на выходе АИН в СБЭП присутствует конденсатор выходного фильтра. Кроме того, на входе СБЭП типа «on-line» или со стороны зарядного устройства могут присутствовать фильтры. Таким образом, характер переходного процесса при коммутациях потребителя со СБЭП на ДГС может быть непредсказуемым.

Дополнительной особенностью, осложняющей работу ДГС, является несинусоидальный характер потребляемого тока ввиду нелинейной нагрузки, например выпрямительного типа. В завершение отметим тот известный факт, что для ДГС нежелательна работа как на холостом ходу, так и на максимальной нагрузке. Для большинства современных ДГС нагрузка должна быть не менее 25–40 % от номинальной только в течение ограниченного времени (обычно 1–2 часа, а в ряде случаев 15–30 мин). После работы в этом режиме требуется прожиг, проводимый на нагрузке порядка 70–80 % от номинальной [114]. Это обстоятельство объясняется тем, что на малых нагрузках из-за невысокой температуры выхлопных газов смазочное масло, попадающее в камеру сгорания и частично выносимое в коллектор и выхлопной трубопровод, полностью не сгорает, а оседает на их стенках, элементах турбоагрегата, клапана и т. п., где коксуется. При длительной работе дизеля в таком режиме это коксование приводит к уменьшению сечения соплово-

го аппарата турбонагнетателя и, как следствие, к нарушению нормальной работы ДГС. Более того, при последующих пусках и попадании топлива в выхлопную систему это может привести к взрыву («хлопку»), который часто сопровождается повреждением дизеля [114].

Вышеуказанные особенности требуют тщательного изучения характеристик ДГС и СБЭП, если речь идет об их совместной работе. Строго говоря, вопрос взаимодействия СБЭП, ДГС и промышленной сети до сих пор «научно открыт», однако рекомендуется придерживаться следующих правил [114].

1. Переходное сопротивление X_d генератора (расчетная величина, характеризующая сопротивление генератора в начале переходного процесса, указывается в каталожных данных на генератор) должно иметь величину порядка 10–35 % от номинального значения индуктивного сопротивления генератора. Это делает удобным управление генератором при минимальной величине X_d , так как искажения напряжения генератора, вызываемые токами гармоник выпрямителя СБЭП, напрямую зависят от этой величины.

2. СБЭП должна иметь конфигурацию, обеспечивающую минимум вносимых искажений тока генератора, так как значительные искажения могут являться причиной неправильной работы регулятора напряжения генератора, что приводит к нестабильности и неудовлетворительному регулированию.

3. Необходимо подавлять токи гармоник, вызывающие добавочные потери и являющиеся причиной перегрева обмоток генератора, или увеличивать мощность генератора.

4. Нежелательно подавлять токи гармоник на генераторе при помощи главного (единого) фильтра, так как это может явиться причиной резонансных явлений, которые могут влиять на регулятор генератора и вызывать перенапряжение на выходе (в некоторых случаях — до 500 В). Лучшим решением при этом является применение 12-импульсного двойного мостового выпрямителя.

5. Необходимо принимать во внимание также мощность и характер других нагрузок, которые могут быть также присоединены к генератору. Если номинальная мощность генератора, предназначенного для работы на выпрямитель, соизмерима с мощностью выпрямителя, то вводится повышающий коэффициент, зависящий от модели и конфигурации СБЭП и типа двигателя. Этот повышающий коэффициент показывает, во сколько раз необходимо увеличить мощность ДГС по сравнению со случаем работы на нагрузку без гармонических искажений.

Диапазон значений повышающего коэффициента лежит в пределах 1,05...1,3. Если генератор обеспечивает электроснабжение также и других нагрузок (нагрузок, не вносящих искажения), то его мощность должна быть равна мощности других нагрузок, плюс мощность выпрямителя ИБП, умноженная на повышающий коэффициент.

6. Систему ДГС—СБЭП желательно оснастить устройствами программного подключения СБЭП к ДГС — с плавным или ступенчатым вводом в работу. Вне зависимости от типа, все они обеспечивают нормированное подключение нагрузки к ДГС. Наиболее совершенные устройства плавного ввода в работу позволяют путем несложной перенастройки, которая может быть выполнена непосредственно на месте монтажа (эксплуатации), устанавливать оптимальную для данной установки мощность, переводимую в единицу времени с АБ СБЭП на ДГС.

В табл. 6.1 приводятся сведения о выпрямителях, применяемых в СБЭП типа двойного преобразования, которые следует учитывать при выборе конфигурации для совместной работы ДГС и СБЭП. Первые две позиции конфигураций 6-импульсных выпрямителей с фильтрами не подходят для совместной работы из-за высокого уровня искажений и ёмкостного характера нагрузки, которую представляет СБЭП для ДГС. Позиции с третьей по пятую в разной степени пригодны для совместной работы. Следует обратить внимание на то, что квази-12-импульсный выпрямитель на самом деле не является опцией одного СБЭП, а составлен из двух различных конфигураций СБЭП, входящих в параллельный комплекс. На практике наиболее часто используется конфигурация СБЭП с 12-импульсным выпрямителем, вне зависимости от того, входит он в параллельный комплекс или нет. В наибольшей степени для согласования с ДГС подходит СБЭП с активным выпрямителем напряжения, формирующий во всех режимах работы СБЭП синусоидальную форму входного тока при коэффициенте мощности, равном единице.


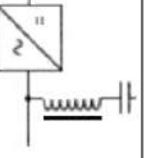
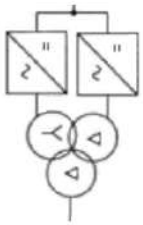
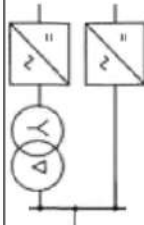
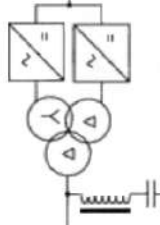
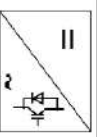
Расчет мощности ДГС для совместной работы со СБЭП осуществляется в следующей последовательности [113, 114]:

1. Определяются технические данные и свойства СБЭП, которую планируется использовать совместно с ДГС:

- мощность;
- КПД;
- коэффициент мощности СБЭП;
- коэффициент нелинейных искажений входного тока (табл. 6.1);
- способность плавной (ступенчатой) нагрузки ДГУ;
- мощность заряда АБ (возможность задержки заряда АБ).

Таблица 6.1

Трансформаторно-выпрямительные блоки СБЭП для совместной работы с ДГС

№ п/п	Наименование схемы выпрямителя	Схема выпрямителя	Величина гармоник тока, %	Преимущества	Недостатки	Пригод- ность для работы с ДГС
1	6-импульсный		27,8	Низкая стоимость, простота	Большое содержание гармоник, ДГС может перегреваться	—
2	6-импульсный + фильтр 5, 7, 11, 13-й гармоник		7,0	Подавление 5, 7, 11, 13-й гармоник, входной cosφ ≈ 1	Емкостная нагрузка может вызвать провалы с регулятором ДГС, не подавляет гармоники высших порядков	—
3	12-импульсный		9,4	Подавление 5, 7, 17, 19, 29, 31-й гармоник, отсутствует влияние на ДГС, гальваническая изоляция	Входной cosφ достаточно низок (0,83)	+++
4	Квази-12-импульсный		9,7	Подавление 5, 7, 17, 19, 29, 31-й ... гармоник	Входной cosφ ≈ 0,83, применение возможно только в параллельной конфигурации (комплексе)	+
5	12-импульсный + фильтр 5, 7, 11, 13-й гармоник		2,4	Подавление 5, 7, 11, 13, 17, 19, 29, 31-й ... гармоник, гальваническая изоляция, входной cosφ ≈ 1	Наибольшая стоимость	++
6	Активный выпрямитель		< 2	Входной cosφ ≈ 1	Средняя стоимость	+++

2. Рассчитывается мощность ДГС ($P_{\text{ДГС}}$) для ДГС без турбонаддува:

$$P_{\text{ДГС}} = m \times 1/p \times (P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_{\text{зар АБ}}) + P_B, \quad (6.1)$$

где m – повышающий коэффициент (в соответствии с документацией); η – КПД СБЭП; $P_{\text{зар АБ}}$ – мощность заряда АБ; P_B – мощность нагрузок группы B ; p – коэффициент, учитывающий снижение нагрузочной способности ДГС при коэффициенте мощности СБЭП менее 0,8.

3. Расчет мощности ДГС для случая плавного пуска СБЭП, независимо от типа двигателя ДГС, производится по формуле (6.1).

4. Расчет мощности ДГС для случая наброса нагрузки от СБЭП скачком на ДГС с турбонаддувом осуществляется по формуле

$$P_{\text{ДГС}} = 1,82 \times (P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_{\text{зар АБ}}) + P_B \quad (6.2)$$

при

$$P_B = 1,82 \times (P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_{\text{зар АБ}}) - 1,25 \times 1/p \times (P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_{\text{зар АБ}}). \quad (6.3)$$

5. Расчет мощности ДГС для случая наброса нагрузки от СБЭП скачком на ДГС с турбонаддувом и заряда АБ с задержкой осуществляется по формуле

$$P_{\text{ДГС}} = 1,82 \times P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_B. \quad (6.4)$$

Мощность нагрузок группы B определяется из выражения

$$P_B = 1,82 \times P_{\text{СБЭП}}/\eta - 1,25 \times 1/p \times (P_{\text{СБЭП}}/\eta + P_{\text{зар АБ}}). \quad (6.5)$$

6. Мощность ДГС с учетом потерь в сетях и расходов электроэнергии на собственные нужды определяется по формуле

$$P_{\text{ДГС расч}} = P_{\text{ДГС}} K_{\text{пот}} / K_{\text{СН}}, \quad (6.6)$$

где $K_{\text{пот}} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в сетях с напряжением 0,4 кВ; $K_{\text{СН}} = 0,95...0,97$ – коэффициент, учитывающий расход электроэнергии на собственные нужды.

Данные формулы приводятся для случаев, когда пусковые токи электроприемников группы B невелики и существенно не влияют на условия приема нагрузки ДГС.

Контрольные вопросы

1. Приведите схему аварийного электроснабжения, использующую совокупность СБЭП и ДГС.
2. Сформулируйте основные правила организации взаимодействия СБЭП и ДГС.
3. Как схема СБЭП может влиять на процесс перехода СБЭП на ДГС?
4. Какая из схем входных блоков СБЭП наиболее эффективна для целей осуществления взаимодействия СБЭП и ДГС?

Глава 7. МОНИТОРИНГ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Вне зависимости от указанных выше разновидностей структурного построения современные СБЭП в своем составе содержат, как правило, встроенную систему диагностики режимов работы и параметров [115, 116]. Наличие указанной системы, ее сложность, а также сервисные возможности определяются в конечном счете назначением СБЭП либо пользователем. Диапазон «сервисности» систем диагностики — от простых светодиодных индикаторов основных режимов работы СБЭП типа «Сеть» — «Инвертор», расположенных на передней панели, до сложного программного обеспечения при взаимодействии с ПЭВМ. При этом интерес представляет как контроль параметров АБ, как наиболее сложной в математическом плане части СБЭП, так и создание программного обеспечения для всей СБЭП с системой визуализации для ПЭВМ.

В настоящее время ведущие мировые производители СБЭП придают диагностике (мониторингу) их режимов и параметров большое значение, а для некоторых компаний мониторинг выделился в самостоятельную коммерческую деятельность. Так, фирма «*BMMS*» (Великобритания) предлагает свои экспертные услуги по автомониторингу и обслуживанию резервных АБ, диагностике неполадок в системах электропитания [117]. Фирма «*Benchmark Microelectronic*» предлагает для мониторинга процесса заряда никель-металлгидридных и литиевых АБ системы *BQ 2004* и *BQ 2014* [118], а «*Liebert*» (Великобритания) с 1993 г. совместно с компаниями США имеет программу по тестированию и своевременной замене АБ в системах электропитания по результатам диагностики [119]. О создании модулей для мониторинга АБ в СБЭП с передачей данных по оптико-волоконной связи с целью взаимодействия с ПЭВМ сообщается в [120], о подобной микропроцессорной системе для СБЭП — в [121–123]. Согласно [124], ряд фирм («*MCM Enterprise Ltd.*», «*Electric Power Research Institute*», «*Empire State Electric Energy Research Corp.*», «*Consolidated Edison Company*» и «*Bonneville Power Administration*») приняли участие в разработке системы непрерывного мониторинга состояния свинцовых АБ и т. д.

Подобная заинтересованность контролем режимов и параметров СБЭП подкрепляется экономическими обоснованиями. Считается, что применение системы контроля в СБЭП 10...100 кВА позволяет увеличить срок службы АБ на 40 % и снизить эксплуатационные расходы по обслуживанию СБЭП за счет увеличения интервала между плановыми обслуживаниями [125], а удорожание системы контроля с 25 до 110 марок ФРГ на одну АБ СБЭП в конечном итоге рационально, учитывая работы на восстановление повреждений обслуживаемых систем [126].

Правильнее говорить не только о мониторинге СБЭП при помощи специализированного программного обеспечения (ПО), но и управлении. Причем управление может быть как локальным, непосредственно с органов управления СБЭП, так и удаленным. В настоящее время применение программного обеспечения для мониторинга и управления СБЭП продиктовано потребностью в обеспечении сохранения информации и корректной работы программного обеспечения в вычислительных сетях организаций любого масштаба. Назначение ПО заключается в преобразовании информации, полученной от СБЭП по каналам связи, преобразовании их в набор статистических или графических данных, в предоставлении удобного интерфейса для формирования и отправки сигналов управления СБЭП, а также в обеспечении удобного человеко-машинного интерфейса. ПО является незаменимым и полностью интегрированным элементом системы, повышающим её работоспособность и обеспечивающим защиту процессов. При этом обеспечиваются функции:

- организации информационной связи между комплексом СБЭП (основными и дополнительными) и серверами (*NetWare*, серверами *Windows NT*), управляющими вычислительными комплексами и аналогичным оборудованием;
- использования стандартного (входящего в состав соответствующих операционных систем) и специализированного программного обеспечения, устанавливаемого на серверы, для работы с подключенными к ним СБЭП;
- организации процесса закрытия файловых систем серверов в автоматическом режиме при завершении ресурса АБ с последующим отключением нагрузки и выключением СБЭП для предотвращения критического разряда АБ;
- оповещения пользователей о возникающих неисправностях в электрической сети, о предстоящем закрытии файловых систем серверов и отключении СБЭП;

- обеспечения приема дополнительной информации от датчиков, подключаемых к специальным входам СБЭП, и передачи ее по локальной сети. В качестве таких устройств могут использоваться датчики задымления, повышения температуры, системы контроля доступа в помещение, где располагается СБЭП, и аналогичные устройства. Существует также возможность подключения исполнительных устройств, управление которыми в автоматическом или ручном режиме производится с помощью программ мониторинга СБЭП.

Пример организации «локальной» системы контроля режимов и параметров в линейно-интерактивной СБЭП ПОС-10000 АЛТЗ.211.211 ФГНУ НИИ автоматики и электромеханики (г. Томск) представлен на рис. 2.5 (гл. 2).

СБЭП построена на основе транзисторного инвертора И напряжения с ШИМ, который функционально связан с фильтром Ф выходного напряжения, трансформатором Тр и силовыми ключами Кл. При наличии сетевого напряжения СБЭП постоянно корректирует его величину, поддерживая на нагрузке Н номинальное значение напряжения, не обращаясь к услугам АБ. При этом датчики напряжения, фазы и тока постоянно находятся в активном режиме и следят за состоянием сети, синхронизируя с ней сигналы схемы управления СУ СБЭП. Поток электроэнергии из сети дополнительно направлен через зарядное устройство ЗУ к АБ, состояние которой постоянно контролируется схемой контроля СКАБ.

При чрезмерном отклонении сетевого напряжения от нормы или его пропадании СБЭП мгновенно переходит в инверторный режим с потреблением энергии от АБ. Основная сеть принудительно отключается. В этом режиме СКАБ заранее сообщает пользователю о наступлении критического состояния АБ. При появлении сетевого напряжения СБЭП тестирует его, синхронизируется и безобрывно переводит потребителя на питание от сети, переходя снова в дежурный режим. Вся информация о режимах работы СБЭП отображается на панели управления, а также передается на ПЭВМ через устройство сопряжения и порт RS-232. Байпасный ключ Б позволяет принудительно перевести нагрузку на сеть при проведении регламентных или ремонтных работ в СБЭП.

На панели управления отображается необходимая информация о режимах и параметрах СБЭП. При этом индикация режимов работы осуществляется следующими светодиодными индикаторами:

- «СЕТЬ» — зеленого цвета. Означает наличие сетевого напряжения на входе СБЭП, при этом сетевое напряжение на нагрузке не кор-

ректируется. Путь поступления сетевого напряжения на нагрузку поясняет индикатор «БАЙПАС-СЕТЬ»; при комбинации с индикатором зеленого цвета «ВКЛ» СБЭП производит коррекцию (стабилизацию) напряжения на нагрузке;

- «ИНВЕРТОР» — зеленого цвета. Означает работу СБЭП от АБ;
- «Заряд АБ» — желтого цвета. Означает режим заряда АБ;
- «КРИТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД АБ» — красного цвета. Означает либо прохождение критических точек на разрядной кривой (мигание, сопровождаемое прерывистым звуковым сигналом), либо аварийное отключение АБ при приближении недопустимо глубокого разряда;
- «ПЕРЕГРУЗКА» — красного цвета. Означает 10%-ю перегрузку инвертора;
- «ЗАЩИТА I» — красного цвета. Означает отключение инвертора при недопустимой перегрузке по току или от короткого замыкания в нагрузке.

Информационное цифровое табло на световых индикаторах по желанию пользователя в течение одной минуты после выбора режима индикации отображает электрические параметры нагрузки либо АБ. Длительный режим индикации — напряжение на нагрузке. К неэлектрическим параметрам, отображаемым указанным индикатором, относится время работы АБ до критического разряда, вычисляемого блоком СКАБ на основе математической модели используемого аккумулятора.

Информация о режимах СБЭП может быть выведена и на экран ПЭВМ. В качестве среды разработки программы для ПЭВМ использован язык *Delphi*, поскольку он является одной из наиболее мощных программных сред объектного проектирования и создания приложений. Среда разработчика в *Delphi* состоит из ряда элементов, которые всегда присутствуют на экране: главного окна (включающего панель быстрого доступа и палитру компонентов), инспектора объектов и двух окон — окна для визуального создания приложений и окна для написания кода (редактора), а также утилит, которые становятся доступными в определенных случаях, — дизайнера меню и графического редактора. Для создания проекта применена многодокументная форма интерфейса, поскольку для создания, редактирования, анализа и открытия многих других окон, их упорядочивания просто необходим многодокументный интерфейс.

Главная форма выбрана как приложение *Windows 95, 98*. Дополнительные формы созданы в процессе разработки программы — это в основном диалоговые окна и *MDI*-компоненты, которые позволяют работать одновременно с несколькими документами.

В программе есть главное и локальное меню, которое вызывается при нажатии правой кнопки мыши на поле редактора.

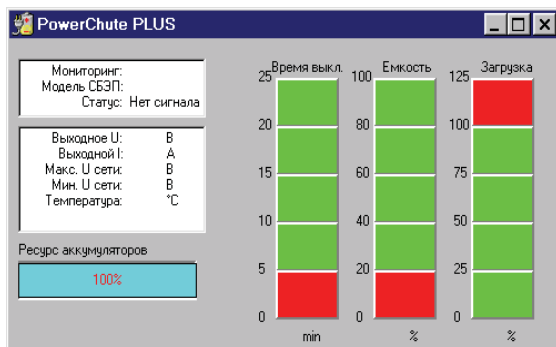
Главное меню, как и локальное, меняются или дополняются при работе с разными формами и окнами. К примеру, при вызове редактора параметров из меню исчезают некоторые пункты, которые там есть при обычном редактировании. Локальное меню в редакторе параметров содержит лишь часть локального меню простого редактора и др.

Алгоритм программы является простым линейным алгоритмом с условными и безусловными переходами. Согласно алгоритму программа ждет появления данных с порта *RS-232*. Алгоритм запроса в *Windows API* подразумевает то, что опрос производится в течение небольшого промежутка времени, после чего управление передается другим программам или процедурам (многозадачный режим). Если в этот промежуток данные поступили, то программа продолжает свою работу. Иначе делается запрос снова. После того, как данные поступили, программа запоминает их и в дальнейшем использует эти данные для вычисления разрядной емкости АБ, полной потребляемой мощности и времени оставшейся работы СБЭП.

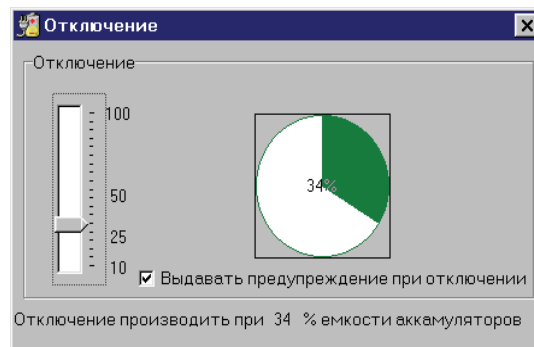
Если система не перешла на резервное питание от АБ, то в данных содержится текущее значение напряжения питающей сети, тока и напряжения на нагрузке, которые необходимы для вычисления полной потребляемой мощности, выводимой на экран. В случае резервного питания, данные содержат напряжение, ток и температуру инвертора; напряжение, ток и температуру АБ. По этим данным ведется вычисление разрядной емкости АБ и прогнозируемого времени работы СБЭП.

В случае, если какой-нибудь контролируемый параметр вышел за пределы допустимой нормы, например напряжение сети превысило десятипроцентный допуск, то фиксируется дата и время появления аварийной ситуации, а также время ее окончания. Если значение параметра является критическим, то требуется завершение работы. Программа сохраняет все данные на диск, после чего выключает компьютер. Иначе, программа продолжает свою работу. Таким образом, программа осуществляет контроль параметров в двух режимах: в режиме питания от сети; в режиме питания от АБ.

Так как программа является многооконной, то в ней существуют несколько форм, в которых осуществляется контроль и настройка критических значений параметров. Вид форм приведен на рис. 7.1, а–г.



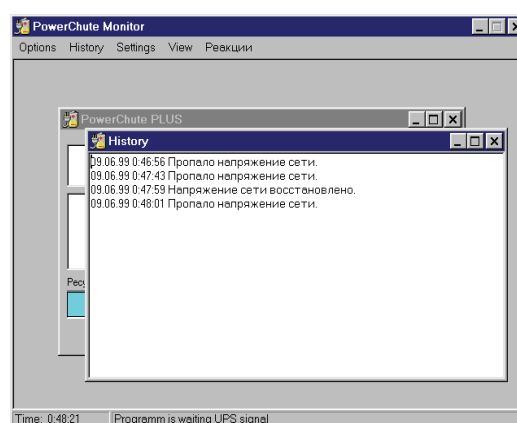
а



б



в



г

Рис. 7.1. Формы системы контроля: а) основные параметры СБЭП; б) настройка выключения СБЭП; в) температура ключей инвертора; г) форма истории

Самая главная форма, появляющаяся всегда после возникновения какой-нибудь ситуации (переход на АБ, превышение напряжения сети, перегрузка системы), – это форма основных параметров.

Рассмотрим взаимодействие формы с данными. Главное окно состоит из элементов, отражающих следующую информацию (рис. 7.1, а):

- верхняя область (слева) отображает справочные параметры системы:

- **Мониторинг:** система диагностики (возможные значения «от сети» или «от АБ»);

- **Модель СБЭП:** модель системы;

- **Статус:** статус от контроллера сопряжения;

- средняя область (слева) отображает параметры состояния системы:

- **Выходное U :** действующее напряжение на нагрузке;

- **Выходной I :** действующий ток в нагрузке;

(эти параметры обновляются каждую секунду, а в случае если один из параметров выйдет за пределы нормы, он окрашивается в красный цвет);

— **Макс. U сети:** максимальное напряжение сети в течение последних суток. Если напряжение сети превысит допустимую норму, оно заносится в файл истории;

— **Мин. U сети:** то же, для минимального напряжения сети;

— **Температура:** максимальная температура ключей инвертора. Если значение температуры инвертора превысит допустимую норму, выводится форма температуры ключей инверторов, представленная на рис. 7.1, в. Измерение производится один раз в минуту, при этом программа сохраняет предыдущее значение. В случае превышения температуры столбик соответствующего ключа окрашивается в красный цвет;

- нижняя область (слева) **Ресурс аккумуляторов** отображает прогностические параметры системы, содержит информацию об оставшихся зарядно-разрядных циклах. Изначально в программу вводится число зарядно-разрядных циклов. Далее после каждого полного разряда АБ программа вычитает их количество;

- область справа отображает динамические параметры непрерывного функционирования системы:

- шкала **Время выкл:** вертикальная полоса, высота которой зависит от оставшегося времени работы АБ. Программа использует модель применяемых АБ;

- шкала **Емкость:** вертикальная полоса, высота которой зависит от разрядной емкости АБ, которая вычисляется при использовании моделей применяемых АБ;

- шкала **Загрузка:** вертикальная полоса, высота которой зависит от величины нагрузки. Данный параметр определяется как отношение паспортной мощности к полной мощности. Допускается превышение не более чем на 10 %. Кратковременные перегрузки в момент включения нагрузки не фиксируются.

Параметры, попадающие в диапазон, представленный красным цветом шкалы, являются критическими.

Форма, представленная на рис. 7.1, б, — настройка выключения. В ней задается оставшаяся разрядная емкость АБ, ниже которой программа завершит свою работу и выключит компьютер и СБЭП.

Историю можно просмотреть в файле «History».

Всеми представленными формами управляет главная форма программы-монитора. Здесь необходимо отметить, что программа имеет открытую архитектуру и собирается из кирпичиков во время выполнения, а не компилирования. Вследствие этого не представляется сложным преобразовать или добавить какие-либо окна для нового параметра.

Основу системы мониторинга СБЭП составляет контроллер, предназначенный для оценки состояния АБ, а также измерения и отображения следующих параметров:

- выходное переменное напряжение;
- входное переменное напряжение;
- напряжение АБ;
- переменный ток нагрузки;
- постоянный ток разряда АБ;
- постоянный ток заряда АБ;
- полная и активная мощность нагрузки;
- мощность в цепи АБ;
- резерв времени АБ в инверторном режиме.

Дополнительно контроллер обеспечивает подачу предупредительного сигнала (звукового и по последовательному порту RS-232) при уменьшении возможного времени работы АБ до определенного, наперед заданного значения (например, 10 мин).

Функционально контроллер состоит из следующих блоков: блока управления, блока входных усилителей, электронного коммутатора, блока аналого-цифрового преобразования, микропроцессора (МП), блоков индикации – цифрового и буквенного, блока памяти данных (электрически перепрограммируемой) и блока выдачи предупредительных сигналов.

Алгоритм работы контроллера построен следующим образом.

В зависимости от того, есть сетевое напряжение или работает инвертор, контроллер работает, соответственно, в одном из двух основных режимов: «Сеть» или «Инвертор». В режиме «Сеть» МП поочередно подключает к блоку АЦП каждый аналоговый канал. Оцифрованный сигнал в двоичном коде считывается по шине данных в память МП и умножается на масштабирующий коэффициент. После оцифровки всех сигналов МП рассчитывает мощность подключенной нагрузки.

Результат измерения выводится на индикаторное табло. Цифровое значение отображается на однострочном шестнадцатиразрядном цифро-буквенном жидкокристаллическом индикаторе. При этом используется динамический метод индикации. Для смены канала на передней панели имеется кнопка, при однократном нажатии на которую происходит циклический перебор всех измеряемых параметров.

При пропадании напряжения сети контроллер переходит в режим «Инвертор». МП учитывает количество отключений сети с целью внесения поправки на амортизацию АБ в зависимости от количества циклов за-

ряда-разряда. Далее, по измеренному току разряда рассчитывается остаточная емкость батареи и, соответственно, оставшееся время работы батареи при данной нагрузке. Остановимся на этом расчете подробнее. В Flash-памяти данных записаны таблицы соответствия тока разряда (в амперах) и оставшейся емкости (в Ач). В одну микросхему памяти помещаются таблицы для батарей различных типов, выбор конкретной батареи осуществляется комбинацией перемычек на плате контроллера. В эту же микросхему памяти записывается результат счетчика отключения сети.

По измеренному току разряда из таблицы находится оставшаяся емкость разряда для «свежей» АБ. Точное значение вычисляется методом линейной аппроксимации между узлами таблицы. Затем это значение уменьшается на величину уже потраченной емкости, умножается на коэффициент старения АБ и корректируется в зависимости от ее внутренней температуры. По полученной таким образом емкости АБ вычисляется оставшееся время разряда при данной мощности нагрузки. При изменении тока потребления соответствующим образом пересчитывается время и данный параметр выводится на индикацию под названием «Резерв АБ». Когда оставшееся время разряда достигнет граничного значения (заранее записанного в память МП), контроллер подает звуковой сигнал для предупреждения персонала об отключении нагрузки и выдает по порту RS-232 команду для компьютеров для завершения работающих программ или отключения части потребителей.

Когда напряжение сети вновь появляется, контроллер переходит в режим «Сеть», но с дополнительной функцией контроля заряда АБ. Измеряя ток заряда АБ, МП рассчитывает текущую емкость АБ, исходя из той емкости, которая осталась после работы в режиме «Инвертор». По мере заряда зарядный ток уменьшается, и когда он достигнет 300 мА, от основного блока в контроллер поступает сигнал «Конец заряда», что означает полный заряд АБ и равенство текущей емкости батареи максимальному значению, записанному в таблицу. Если до окончания заряда опять пропадет сетевое напряжение, то МП будет рассчитывать оставшуюся емкость разряда исходя из емкости, до которой зарядилась батарея. Таким образом, контроллер постоянно контролирует текущее состояние АБ и нагрузки. Также в СБЭП использованы информативные свойства инвертора, позволяющие определять полное сопротивление АБ на частоте 100 Гц и тем самым идентифицировать ее остаточную емкость на основе предварительных измерений (см. гл. 4).

В контроллере использован микропроцессор фирмы «Atmel» типа AT89C52, программно соответствующий формату Intel-51 с электриче-

ски перепрограммируемой памятью. Рабочая частота — 12 МГц, напряжение питания — 5 В. Память данных — электрически перепрограммируемая, шина данных адреса — последовательная, формата *PC*. Погрешность канала аналого-цифрового преобразования — 0,1 %.

Если с помощью СБЭП защищается одиночный компьютер либо рабочая станция, подключенная к локальной вычислительной сети, но для других пользователей не требуется информация о состоянии данной СБЭП, то информационная связь СБЭП—ПЭВМ не реализуется. В случае защиты группы ПЭВМ производится дополнительное соединение (как правило, с помощью кабеля для передачи данных по последовательному протоколу *RS-232*).

Многие СБЭП оснащены дополнительными средствами для управления сразу несколькими серверами, что необходимо в том случае, если один из серверов (ведущий) при необходимости подает команду «остановки» другим серверам (ведомым). Обычно число ведомых серверов не превышает пяти-шести. Другой, более сложный способ управления СБЭП заключается в использовании простого протокола управления сетью (*Simple Network Management Protocol — SNMP*). Для реализации работы в таком режиме СБЭП должна быть оснащена специальным *SNMP*-модулем (адаптером), который включает ее в разряд сетевых устройств. Со станции, оснащенной системой управления с протоколом *SNMP*, администратор может наблюдать за всеми СБЭП, установленными в распределенной сети, независимо от их физического расположения, изменять их параметры, получать от них сообщения и даже дистанционно перезапускать серверы. Но такой способ управления приемлем лишь для сети, где уже применено администрирование по протоколу *SNMP*.

Еще один способ администрирования системой питания, который становится популярным в связи с грандиозным расширением интернет- и интрасетей, основан на технологии *WWW*. Если корпоративная сеть с установленной СБЭП подключена к Интернету, то появляется новая, исключительно эффективная возможность управления системой питания. Чтобы получить доступ к ней из Интернета, нужно соединиться с сервером предприятия, зарегистрироваться, загрузить специальное мини-приложение с сервера и начать работу прямо из браузера (*Navigator* или *Internet Explorer*). Таким способом можно проверять параметры СБЭП и состояние первичной сети, просматривать журнал регистрации событий в системе, перезагружать сервер или несколько серверов и т. п. Для работы в таком режиме в блоке питания вместо *SNMP*-модуля устанавливают специальную сетевую карту.

Компания «Liebert» для моделей СБЭП *UPStation GXT*, *UPStation GXT2U* и *Infinity* использует специальную плату *Open Comms Web Card*, обеспечивающую СБЭП, в которой она установлена, возможность сетевого обмена с внешними устройствами по протоколам *SNMP* и *Web* (рис. 7.2) [127]. Данная плата может работать при скорости обмена 10 и 100 Мбит/с как в полудуплексном, так и в дуплексном режимах. Ее можно подключить к локальной сети стандарта *Ethernet*, и она поддерживает обмен в протоколе *Web* с компьютерами, на которых установлено приложение для просмотра *web*-страниц (*web-browser*). С помощью платы *Open Comms Web Card* можно осуществлять обмен в протоколе *SNMP* с системами сетевого контроля (*NMS – Network Management System*). При работе платы *Open Comms Web Card* с программой *Liebert MultiLink™* осуществляются такие функции контроля, как оповещение пользователей об отключении питания и выполнение стандартной процедуры отключения операционной системы компьютеров, серверов и рабочих станций. Программный продукт *MultiLink* рассчитан на взаимодействие со всеми наиболее распространенными операционными системами.

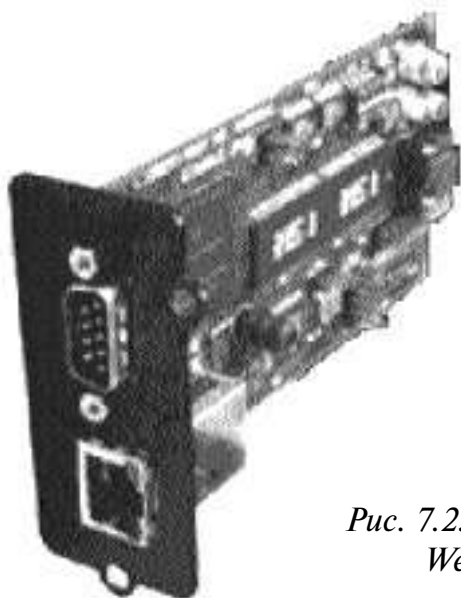


Рис. 7.2. Общий вид платы *Open Comms Web Card* компании «Liebert»

На рис. 7.3–7.11 представлены экранные формы, отображающие работу платы *Open Comms Web Card* с программой *Liebert MultiLink™*.

Доступ для обмена с платой *Open Comms Card* осуществляется путем установки прямого соединения с программой просмотра *web*-страниц (*web-browser*). Плата использует функциональные средства приложения *Microsoft Internet Explorer 5.0* или более поздней версии.

После запуска программы просмотра *web*-страниц в строку поиска *web*-страницы вводится *IP*-адрес или имя платы. Каждый раз, при уста-

новке нового *web*-соединения с платой, на экране появляется директо-
рия *Power Flow* с диаграммой потоков мощности СБЭП. После того как
соединение будет установлено, вид экрана будет аналогичен предста-
вленному на рис. 7.3. Информация на *web*-странице сгруппирована в ви-
де закладок и папок. Плата систематизирует аналогичную информацию,
выводимую на *web*-страницу, собирая ее в одни и те же папки, а анало-
гичные функции отображает под соответствующими закладками.

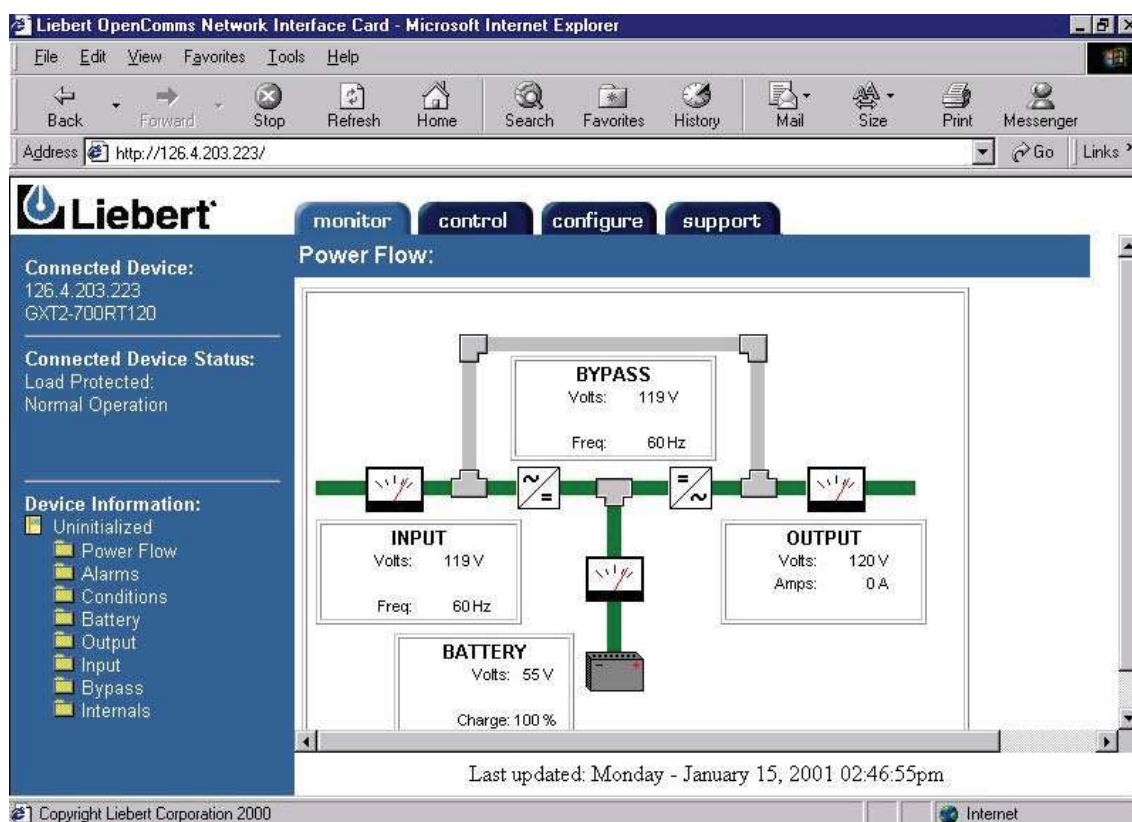


Рис. 7.3. Экранная форма потоков мощности СБЭП *Power Flow*

Закладки (меню) расположены в верхней части рабочей области ок-
на, названия которых соответствуют четырем меню: *monitor*, *control*,
configure и *support*. Каждое из них содержит различные типы данных и
обеспечивает выполнение соответствующих функций.

Папки расположены в левой части экрана. При открытии любого
из меню, в левой части экрана отображается список различных папок,
в которых собрана информация, относящаяся к параметрам просмотра,
управления и настройки, сгруппированная по локальному признаку.
Например, при двойном нажатии левой кнопки мыши в области ото-
бражения папки *Input* (входные параметры) предоставляется доступ к
данным, относящимся только к входной цепи СБЭП (рис. 7.4).

Слева в верхней части рабочей области окна всегда отображается информация о подключенном устройстве и параметры состояния подключенной СБЭП.

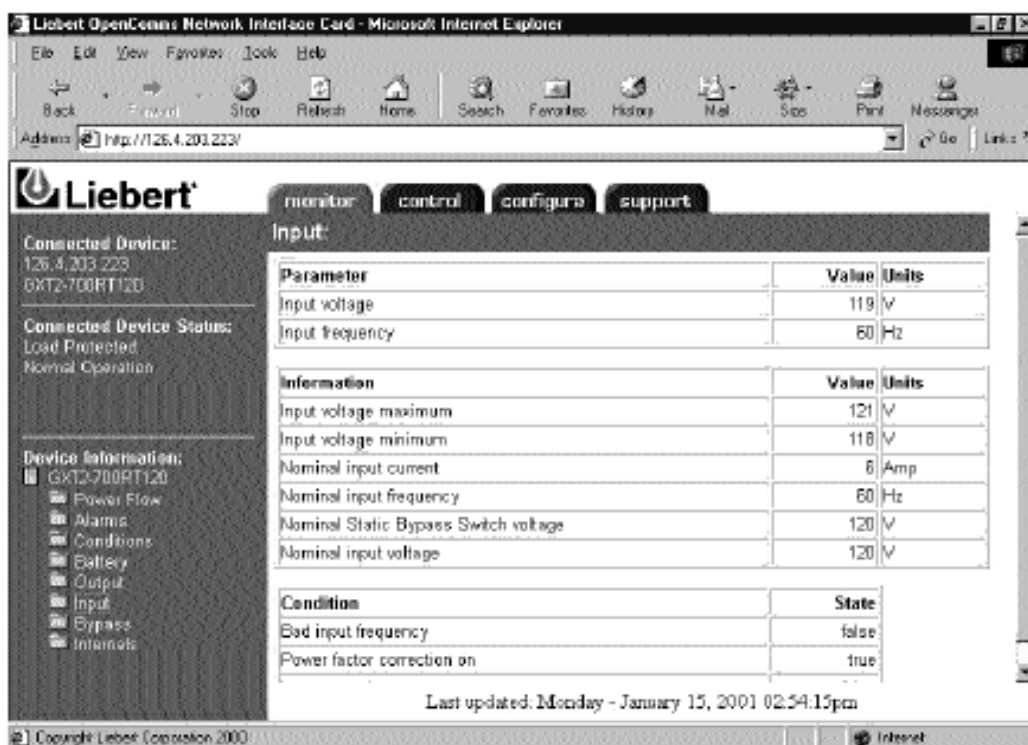


Рис. 7.4. Экранная форма параметров входной цепи СБЭП *Input*

Фактические значения параметров состояния СБЭП представлены в поле **Connected Device Status**. Здесь же, при наличии активных аварийных сигналов, показывается тот сигнал, который имеет наивысшую категорию. В приведенном выше примере СБЭП работает в нормальном режиме и осуществляет защиту нагрузки от перебоев электропитания.

Форма выходных параметров СБЭП (рис. 7.5) аналогична форме входных параметров. На рис. 7.6, 7.7 представлены экранные формы режимов байпасной цепи и АБ. При двойном нажатии левой кнопки мыши, когда ее курсор находится на названии одной из папок **Battery**, **Output**, **Bypass** (эта функция не поддерживается СБЭП модели *Power Sure Interactive*) или **Internals**, общая диаграмма потоков мощности сменяется сводной таблицей всех параметров для выбранной цепи, контролируемой СБЭП. В таблицах данные сгруппированы по значениям параметров, изменяющихся во времени, например входное напряжение (*Input voltage*). Нормированные параметры СБЭП, такие как номинальное напряжение (*Nominal input voltage*) и частота входной цепи (*Input frequency*), представлены в группе *Information*. Наконец, параметры состояния (например отсутствие напряжения в электросети — *Utility failed*) представлены в разделе *Condition*. Содержание списка данных в

каждом из этих разделов различается для СБЭП различных типов и номинальной мощности, в которых установлена плата.

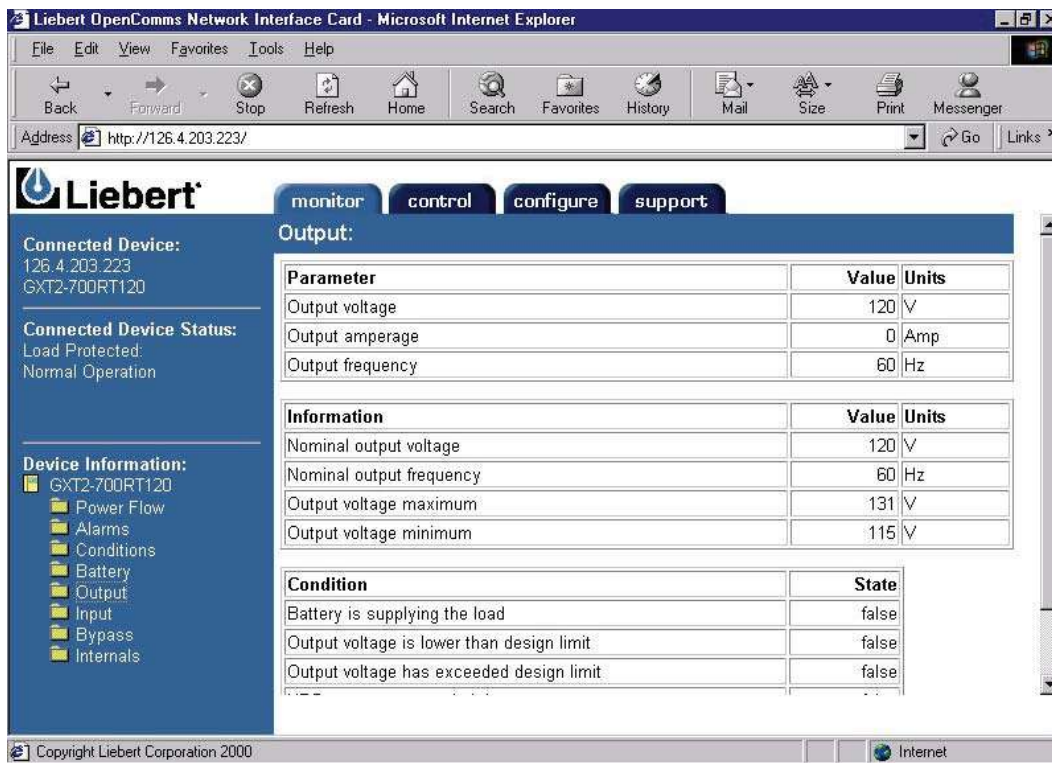


Рис. 7.5. Экранная форма параметров выходной цепи СБЭП Output

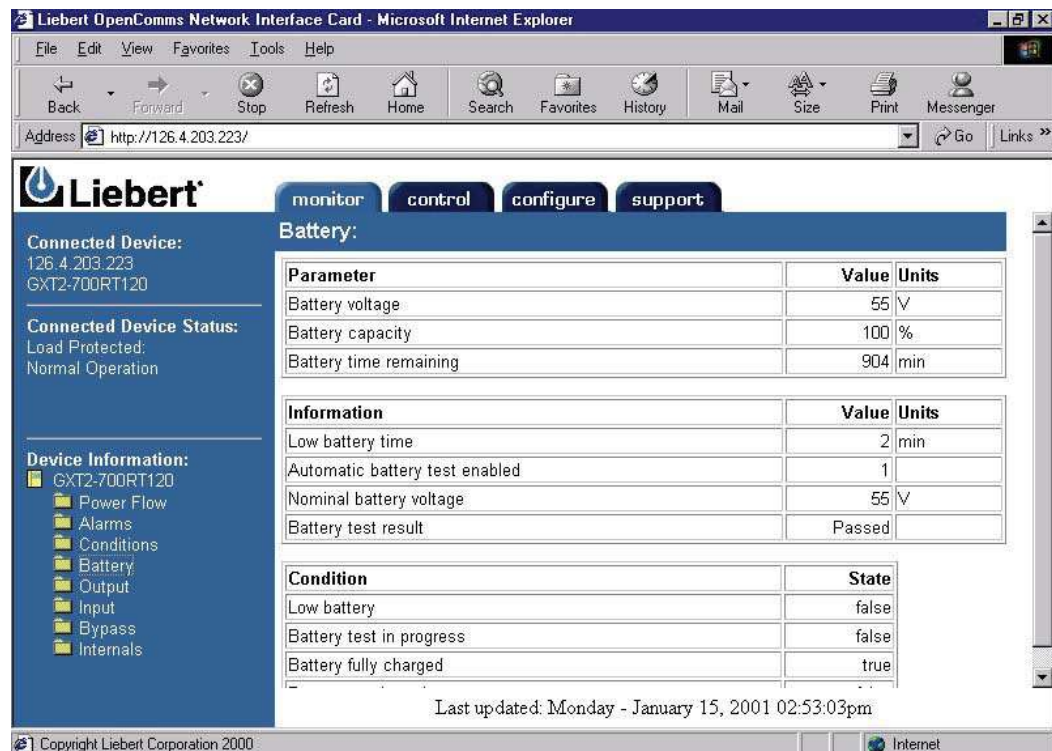


Рис. 7.6. Экранная форма режимов работы АБ СБЭП

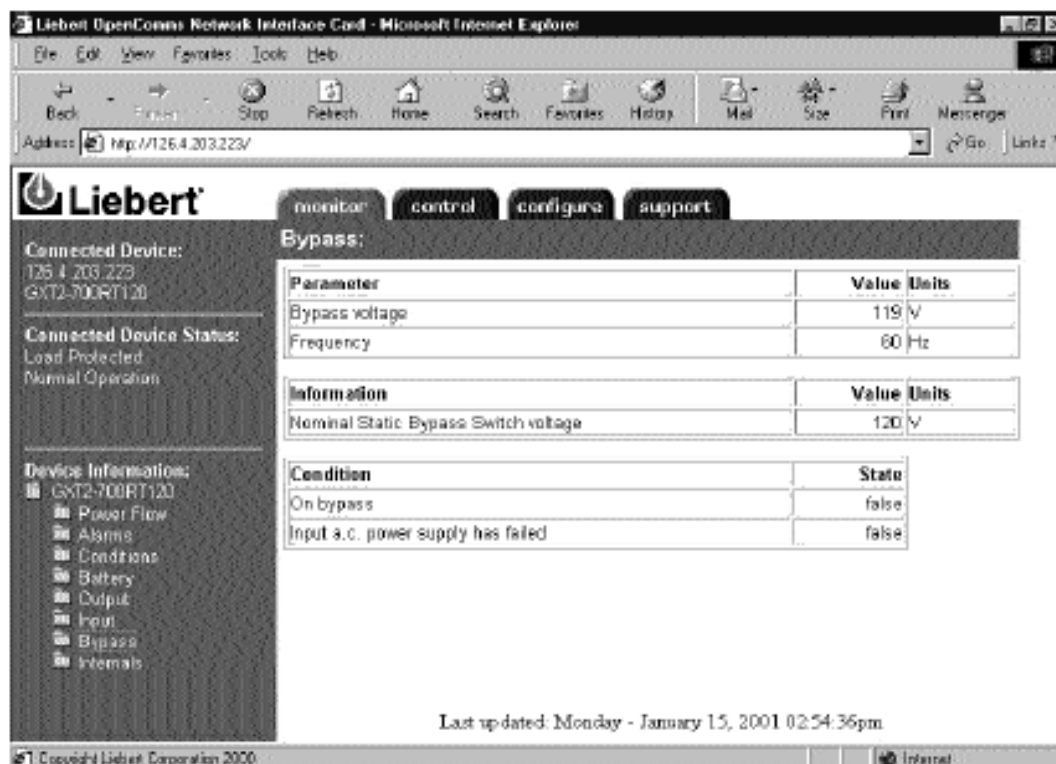


Рис. 7.7. Экранная форма байпасной цепи СБЭП

Обеспечение безопасности. Плата *Open Comms Web Card* обеспечивает любому пользователю, имеющему доступ в данный сегмент сети, возможность ознакомиться с информацией, касающейся условий работы СБЭП. Это означает, что каждый пользователь в данном сегменте может просматривать содержание таблиц параметров, представленных в меню **monitor** и **support**. Однако при этом плата запрещает доступ к папкам, содержащимся в меню управления (**control**) и настройки (**configure**). При попытке пользователя открыть эти меню двойным нажатием левой кнопки мыши по соответствующим названиям в верхней строке экрана появляется табличка с запросом на ввод имени пользователя и пароля (рис. 7.8). В качестве заводской установки обоих параметров (*User Name* и *Password*) используется одно и то же значение – *Liebert*, которое, впрочем, можно и изменить.

Меню «control». Открыв меню управления (**control**) (рис. 7.9), слева в верхней части рабочей области окна будет отображена информация о подключенном устройстве (*Connected Device*) и состоянии данного устройства (*Connected Device Status*). Ниже под заголовком *Control Operations* отобразится список папок. Существует возможность произвести дистанционное отключение звукового сигнала, включение и отключение выхода СБЭП, а также перезагрузку его рабочей программы из ме-

ню управления. В каждой из папок представлены различные типы функций управления. Конкретное содержание списка функций различается для СБЭП различных моделей.

Enter Network Password

Please type your user name and password.

Site: 126.4.203.223

Realm: Realm1

User Name:

Password:

☐ Save this password in your password list

OK Cancel

Рис. 7.8. Экранная форма обеспечения безопасности пользователя

Liebert OpenComms Network Interface Card - Microsoft Internet Explorer

File Edit View Favorites Tools Help

Back Forward Stop Refresh Home Search Favorites History Mail Size Print Messenger

Address: http://126.4.203.223/

Liebert monitor control **configure** support

Connected Device:
126.4.203.223
GXT2-700RT120

Connected Device Status:
Load Protected:
Normal Operation

Control Operations:

Command	Description
Alarm Silence	Temporarily silence the audible alarm.
Output	Turn the output of the UPS On or Off.
Test	Initiate diagnostic tests.

Control Operations:

http://126.4.203.223/control/controlLayout.htm

Рис. 7.9. Экранная форма меню управления *control*

Меню «configure». В меню параметров настройки (*configure*), слева в верхней части рабочей области окна, находится информация о подключенном устройстве (*Connected Device*) и состоянии данного устрой-

ства (*Connected Device Status*) (рис. 7.10). Ниже под заголовком *Configuration Categories* отобразится список папок. При двойном нажатии левой кнопки мыши, когда ее курсор находится на названии одной из папок, выбрав соответствующую папку, в меню параметров настройки возможно изменять значения параметров сети и устройств, включая группы *SNMP* (категории параметров конфигурации). Открыв папку **Device Info** (информация об устройстве), можно вносить изменения в поля *Name* (имя), *Contact* (контактная информация), *Location* (расположение) и *Description* (описание). Заводские установки параметров настройки восстанавливаются при двойном нажатии левой кнопки мыши, когда ее курсор находится на названии папки *Factory Defaults*.

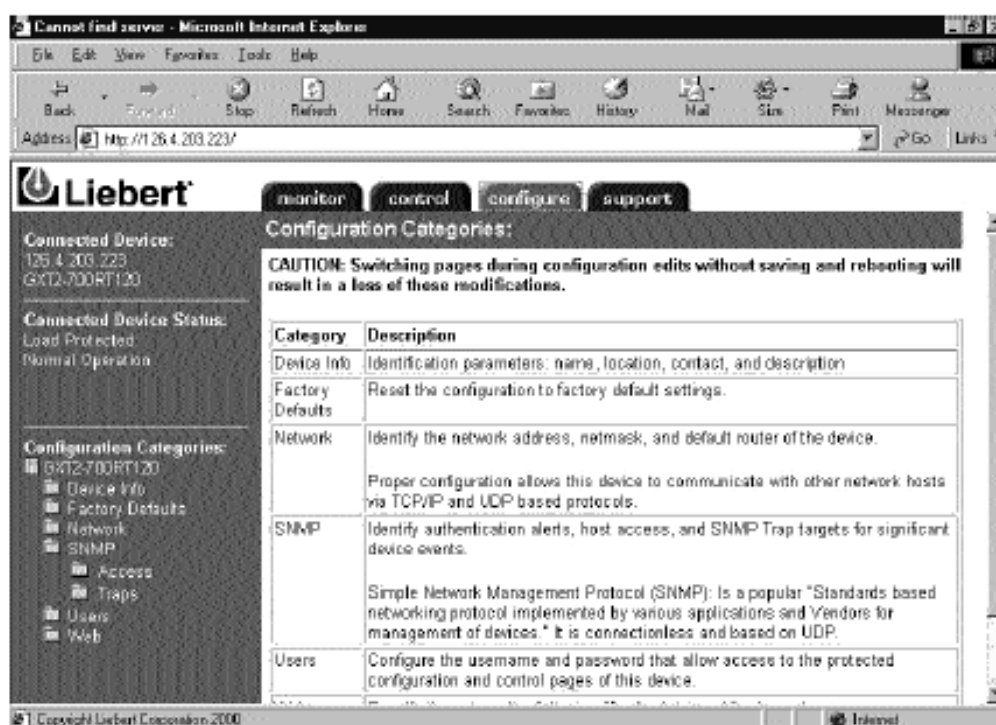


Рис. 7.10. Экранная форма меню управления *configure*

Настройка параметров SNMP. Функция идентификационных прерываний (*authentication traps*) активируется при двойном нажатии левой кнопки мыши, когда ее курсор находится на отображении папки под названием *SNMP*. Выбрав папку *Access* или *Traps* двойным нажатием левой кнопки мыши, пользователю предоставляется доступ к настройкам параметров устройств, которым будет разрешен доступ для обмена с платой, или устройств, от которых плата будет получать сигналы прерывания. Чтобы получить доступ для изменения имени пользователя и пароля, необходимо войти в папку *Users* (пользователи).

Как и в случае настройки параметров платы с использованием сервисного терминала, каждый раз при изменении значения какого-либо параметра плата должна «запомнить изменения и произвести перезагрузку памяти». Это необходимо, чтобы новое значение параметра вступило в силу. Переходя от одной *web*-страницы к другой, можно увидеть, что в меню настройки имеются команды **Edit** (редактировать) и **Save** (сохранить), а также папка **Reinitialization** (повторная активизация). После того как подтверждена функция активизации, доступ к плате по сети обмена невозможен. После перезагрузки платы она начинает сигнальный обмен, в первую очередь со СБЭП, в которой она установлена. В ходе перезагрузки плата будет выводить на экран различную полезную информацию.

Меню «support». Меню *support* (информационная и техническая поддержка) содержит информацию *System Name* (имя системы), *Location* (расположение), *Description* (описание), а также контактную информацию Центра технического сопровождения компании «Liebert» (рис. 7.11).

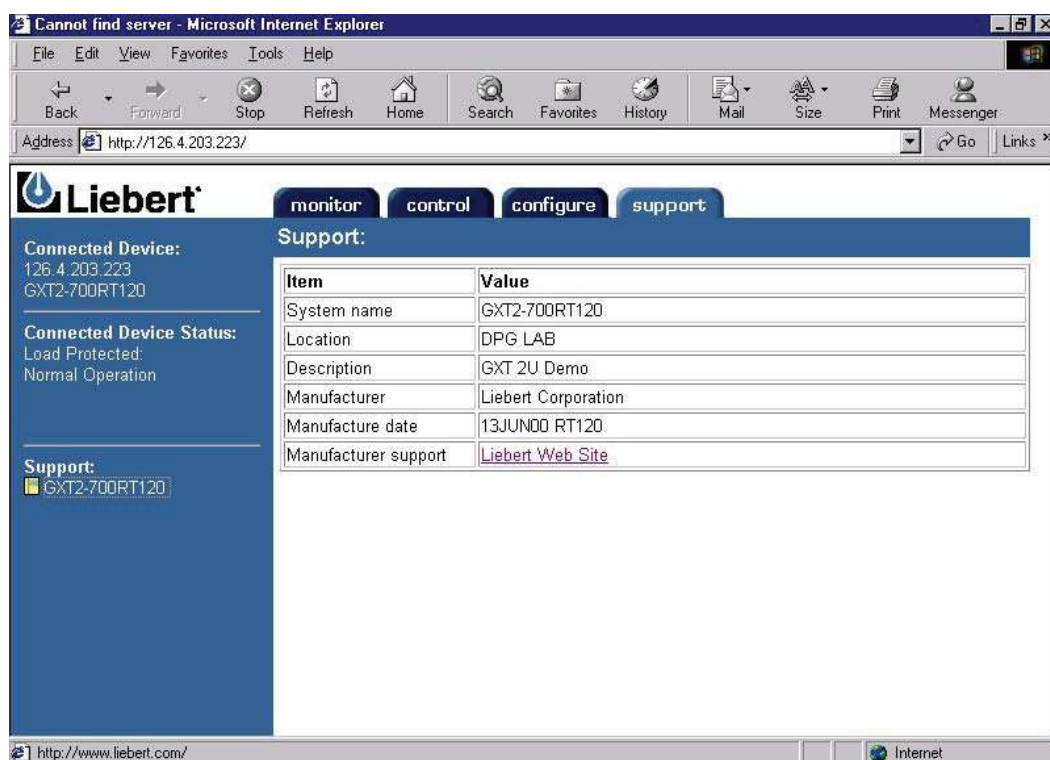


Рис. 7.11. Экранная форма меню управления *support* информационной и технической поддержки

Плата *Open Comms Web Card* работает в качестве узла *SNMPv1*, она полностью совместима с системой *MIB-II*. Плата также поддерживает

общедоступный стандарт *UPS MIB RFC1628* с расширенными функциональными возможностями и поддержкой дополнительных средств, предоставляемых через глобальную сеть распространения продукции компании «*Liebert*». Копия базы данных, содержащей перечень продукции компании «*Liebert*», имеется на компакт-диске, входящем в комплект поставки платы (также доступен сайт: www.liebert.com).

Контрольные вопросы

1. Для чего существуют системы мониторинга параметров и состояния СБЭП?
2. Какие параметры СБЭП может отображать система мониторинга?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент «О безопасности при нарушениях электроснабжения». Проект. Версия 2. Москва 2006. Интернет-ресурс <http://www.vniie.ru>.
2. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. — М.: Энергия, 1978. — 352 с.
3. Королев С.И., Цветков Г.И., Шурыгин Ю.А. Проектирование устройств электропитания средств вычислительной техники. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. — 206 с.
4. Татаркин А.И., Куклин А.И., Нызин А.Н., Калина А.В. Энергетическая безопасность регионов России в 1998 г. // Материалы V Всероссийской конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. — С. 120–121.
5. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Полонский В.В., Целебровский И.В., Шурыгин Ю.А. Опыт применения систем аварийного электроснабжения при проведении хирургических операций и реанимационных мероприятий в лечебных учреждениях г. Томска и Томской области // Здравоохранение Сибири. — 1999. — № 4. — С. 77–78.
6. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Шурыгин Ю.А. Системы аварийного электроснабжения экстренных медицинских отделений // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: сб. статей / под ред. Ю.А. Шурыгина. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1995. — С. 121–126.
7. Гарганеев А.Г. Особенности проектирования медицинских систем бесперебойного электропитания на базе статических преобразователей напряжения // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посв. 40-летию Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — Томск, 2–4 октября, 2002 г. — В 2 т. — Т 2. — С. 14–16.
8. Гарганеев А.Г. Применение систем бесперебойного электропитания в экстренной медицине // Известия ТПУ, 2005. — № 6. — С. 166–171.

9. Чучалин А.И. Математическое моделирование в электромеханике: учеб. пособие. — Томск: ИПФ ТПУ, 1997. — 170 с.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1987. — 248 с.
11. Инструктивное письмо Центрального управления эксплуатации радиотехнического оборудования и связи Министерства гражданской авиации № 51.13.12-575 «О мерах по повышению надежности автономных источников питания электроэнергией».
12. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Целебровский И.В. Обеспечение бесперебойного электропитания ответственных потребителей корабельной автоматики // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (6–8 декабря 2000 г.). — Томск: ИПФ ТПУ, 2000. — С. 101–102.
13. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Житков О.М. и др. Трехфазные статические системы бесперебойного электропитания двигателей переменного тока ответственных систем автоматики // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-6-2000): Доклады VI Международной научно-практической конференции (2–4 октября 2000 г.), Тюмень. — Томск: Изд-во Том. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2000. — С. 73–74.
14. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Госстандарт, 1998.
15. ГОСТ 24607-88. Преобразователи частоты полупроводниковые. Общие технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1989.
16. ГОСТ 26567-85. Преобразователи электроэнергии полупроводниковые. Методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
17. ГОСТ 26416-85. Агрегаты бесперебойного питания на напряжение до 1 кВ. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1989.
18. ГОСТ 27699-88. Системы бесперебойного питания приемников переменного тока. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1988.
19. ГОСТ 19705-89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. — М.: Изд-во стандартов, 1989.
20. Правила Регистра СССР. Морской регистр. — М., 1981.
21. ГОСТ 28279-89. Совместимость электромагнитная электрооборудования автомобиля и автомобильной бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Нормы и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1983.

22. ГОСТ 3940-84. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
23. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость: учебник для вузов железнодорожного транспорта / УМК МПС. 2002. — 638 с.
24. ГОСТ 5237-83. Аппаратура электросвязи. Напряжение питания и методы измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 9 с.
25. ОСТ 45.183-2001. Установки электропитания аппаратуры электросвязи стационарные. Общие технические требования. — М.: ЦНТИ «Информсвязь», 2001. — 29 с.
26. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 664 с.
27. ГОСТ Р51524-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 18 с.
28. ГОСТ Р51318.24-99 (СИСПР 24-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость оборудования информационных технологий к электромагнитным помехам. Требования и нормы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
29. ГОСТ 51514-99 (МЭК 61547-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость светового оборудования общего назначения. Требования и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
30. ГОСТ Р51522-99 (МЭК 61326-1-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Электрическое оборудование для измерения, управления и лабораторного применения. Требования и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
31. ГОСТ Р51317.6.2-99 (МЭК61000-6-2-99). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
32. ГОСТ Р51317.6.1-99 (МЭК 61000-6-1-97). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
33. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной зоны. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. — М.: Изд-во стандартов, 1984.

34. ГОСТ 12.1.006-84. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. — М.: Изд-во стандартов, 1985.
35. Санитарные правила и нормы. Сан.ПиН 2.2.4/218.055-96. Электромагнитное излучение радиочастотного диапазона. — М.: ГК Санэпиднадзор, 1996. — 28 с.
36. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. — М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. — 508 с.
37. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Житков О.М. Интерактивные системы бесперебойного электропитания // Наука производству. — 1999. — № 7(20). — С. 40—41.
38. Задерей Г.П., Заика П.Н. Многофункциональные трансформаторы в средствах вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1989. — 176 с.
39. Повышение надежности централизованных систем бесперебойного электропитания (обзор типовых схем резервирования) / Интернет-ресурс www.380.ru.
40. Источники вторичного электропитания / В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович, Ю.И. Конев и др.; под ред. Ю.И. Конева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1990. — 280 с.
41. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. — Новосибирск: Наука, 1979. — 304 с.
42. Малышков Г.М. Выходные фильтры простейших инверторов. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Советское радио, 1978. — Вып. 10. — С. 178—185.
43. Малышков Г.М. и др. Выбор параметров фильтров инверторов. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1986. — Вып. 17. — С. 148—168.
44. Малышков Г.М. Коэффициент режекции гармоник. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1983. — Вып. 14. — С. 162—169.
45. Малышков Г.М. и др. Схемы селективного подавления гармоник в инверторах с равномерной ШИМ. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь. — Вып. 13. — С. 157—161.
46. Малышков Г.М. Расчет однозвенного фильтра. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь. — Вып. 15. — С. 130—137.
47. Малышков Г.М. Способы аппроксимации синусоидального напряжения дискретными. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1982. — Вып. 16. — С. 116—126.

48. Малышков Г.М. Условно оптимальный синтез ступенчатого напряжения. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1983. — Вып. 14. — С. 151–162.
49. Малышков Г.М., Соловьев И.Н., Колосова Г.И. Выходные фильтры инверторов в классе Д. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1981. — Вып. 12. — С. 172–179.
50. Малышков Г.М., Соловьев И.Н., Колосова Г.И. Способы аппроксимации синусоидального напряжения дискретными. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1982. — Вып. 13. — С. 152–157.
51. Малышков Г.М., Хрунова С.С. Выбор параметров однозвенного фильтра инвертора при широтно-импульсном регулировании ступенчатого напряжения. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1985. — Вып. 16. — С. 126–133.
52. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 376 с.
53. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.И., Шевченко Ю.И. Высокочастотные транзисторные преобразователи. — М.: Радио и связь, 1988. — 288 с.
54. Руденко В.С., Жуйков В.Я., Коротеев И.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. — Киев: Техника, 1980. — 135 с.
55. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. — Киев: Вища школа, 1978. — 424 с.
56. Соловьев И.Н. Выбор режима модуляции инвертора в классе Д — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь. — Вып. 14. — С. 174–184.
57. Соловьев И.Н. Области применения фильтров низкой частоты в инверторах с широтно-импульсной модуляцией. — ЭТВА / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1984. — Вып. 15. — С. 137–140.
58. Тонкаль В.Е. Синтез автономных инверторов модуляционного типа. — Киев. Наукова думка, 1979. — 207 с.
59. Булатов О.Г., Олещук В.И. Автономные тиристорные инверторы с улучшенной формой выходного напряжения. — Кишинев: Штиинца, 1980. — 113 с.
60. Гречко А.И., Тонкаль В.Е. Автономные инверторы модуляционного типа. — Киев: Наукова думка, 1983. — 304 с.
61. А.с. 748793 СССР, МКИЗ, Н03Р 13/18. Способ управления трехфазным мостовым инвертором / В.А. Добрускин, А.Ю. Рождественский, М.А. Житков (СССР). — № 2632494/24-07; заявлено 15.06.79; опубл. 15.07.80. Бюл. № 26. 3 с.: илл.

62. Добрускин В.А., Рождественский А.Ю. Выходное напряжение инвертора с синтезированной ШИМ / Электрооборудование автоматизированных установок. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980. — С. 97–99.
63. Лабунцов В.А. Анализ и синтез тиристорных автономных инверторов напряжения: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — М., 1973. — 60 с.
64. Рождественский А.Ю. Разработка и исследование системы автономный инвертор — асинхронный двигатель с повышенными энергетическими показателями: дисс. ... канд. техн. наук. — Томск, 1982. — 218 с.
65. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 564 с.
66. Цветков Г.И. Разработка и исследование однофазных стабилизированных инверторов с синусоидальным выходным напряжением: дисс. ... канд. техн. наук. — Томск, 1975. — 208 с.
67. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Chip news. — 1999. — № 1. — С. 2–10.
68. Соустин Б.П. и др. Системы электропитания космических аппаратов. — Новосибирск: Наука, 1994. — 318 с.
69. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. — М.: Сов. радио, 1978. — 264 с.
70. Азаров А.Г., Гарганеев А.Г., Полонский В.В. и др. Аккумуляторные батареи в системах бесперебойного электропитания // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: сб. трудов НИИ АЭМ, посв. 30-летию института / под ред. Ю.А. Шурыгина. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. — С. 197–207.
71. Дасоян М.А. Химические источники тока. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 350 с.
72. Вырыпаев В.Н., Дасоян М.А., Никольский В.А. Химические источники тока. — М.: Высшая школа, 1990. — 240 с.
73. ESPACE HI RANGE APPROVAL TEST following BS 6290 Standard-End. 1987. Test related to the materials and components (PAGE 1/1) OLDHAM FRANCE S.A.
74. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
75. Инструкция № 32500-Р по установке, обслуживанию и эксплуатации стационарных герметичных свинцово-кислотных необслуживаемых в течение всего срока службы аккумуляторов серии A500 *Sonnenschein*.

76. Баратов А.Н. и др. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2 кн. — М.: Химия, 1990.
77. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
78. Пугачев Е.В. Аккумуляторные источники питания: модели, характеристики. — Кемерово: Изд-во КГТУ, 1999. — 248 с.
79. Барковский А.Н., Гарганеев А.Г., Гончаров В.И. и др. Параметрическая идентификация аккумуляторного источника питания на основе вещественного интерполяционного метода // Приборы и системы управления. — № 9. — 2003. — С. 53–55.
80. Гарганеев А.Г. Общая постановка задачи математического описания режимов аккумуляторных батарей в системах бесперебойного электропитания переменного тока // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: сб. трудов НИИ АЭМ / под ред. Ю.А. Шурыгина. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — С. 13–19.
81. Пугачев Е.В., Вавиловский В.И. Динамические характеристики тяговой аккумуляторной батареи как объекта автоматического управления // Электричество. — 1984. — № 11. — С. 59–61.
82. Пионтковский Б.А. Пульсация напряжения электропитающих установок связи и способы ее снижения. — М.: Связьиздат, 1963. — 56 с.
83. Городынский А.В., Панов Э.В. Электрический резонанс в электрохимических ячейках // Украинский химический журнал. — 1963. — Т. 29. — С. 883–884.
84. Гладун К.К., Гончаров В.И. Явление электрического резонанса в электрохимических системах и электрохимические преобразователи информации / Химические источники тока: межвуз. сб. тр. — Новочеркасск, 1979. — С. 98–106.
85. Беляев Б.В. Контроль за электропитанием автономных устройств // Автоматика и телемеханика. — 1966. — № 10. — С. 122–125.
86. Беляев Б.В. Надежность химических источников тока в схемах автоматики // Автоматика и телемеханика. — 1965. — Т. 26. — № 1. — С. 173–175.
87. Беляев В.В. Разряды химических источников тока при постоянной силе тока // Электротехника. — 1968. — № 3. — С. 35–38.
88. Вайлов А.М., Эйгель Ф.И. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей. — М.: Связь, 1975. — 152 с.
89. Вайлов А.М., Эйгель Ф.И. Определение параметров схемы замещения аккумуляторной батареи // Электротехническая промышленность. Сер. «Химические и физические источники тока». — 1984. — Вып. 3(96). — С. 12–13.

90. Галюс З. Теоретические основы электрохимического анализа. — М.: Мир, 1974. — 320 с.
91. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические цепи переменного тока. — М.: Наука, 1973. — 125 с.
92. Белей Ф.И. Исследование внутреннего сопротивления никель-железных аккумуляторов при разряде // Электротехническая промышленность. Сер. «Химические и физические источники тока». — М., 1978. — Вып. 2(59). — С. 5–7.
93. Рашевец К.К. Анализ работы тяговых аккумуляторов в режимах нагрузки тиристорными преобразователями электроподвижного состава: автореф. дис.... канд. тех. наук. — Л., 1970. — 18 с.
94. Чернов В.Г. Расчет параметров схемы замещения свинцового аккумулятора с целью определения остаточной емкости / Химические источники тока: межвуз. сб. тр. — Новочеркасск, 1979. — С. 7–12.
95. Голощапов С.С., Кулик А.И., Яковлев Б.С. К расчету выбросов напряжения в автономной системе электроснабжения с транзисторным регулятором напряжения // Электричество. — 1977. — № 4. — С. 76–78.
96. Жирнова Н.Б., Токарев А.Б., Леонова М.В., Золотов А.И. Моделирование характеристик аккумуляторных батарей // Химические источники тока: сб. науч. трудов НПО «Источник» (ВНИАИ). — СПб.: Энергоатомиздат, 1991. — С. 45–51.
97. Теньковцев В.В., Центер Б.И. Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 96 с.
98. Пугачев Е.В. Автоматизированные системы электрооборудования с аккумуляторными источниками питания: уч. пособие. — Кемерово: Изд-во КузГТУ, 1999. — 198 с.
99. Гарганеев А.Г. Оценка режимов и состояния аккумуляторных батарей в системах бесперебойного электропитания переменного тока // Материалы XVI научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», посвященной 50-летию НПЦ «Полус» (19–20 октября 2000 г.). — Томск, 2000. — С. 24–27.
100. Оркина Т.Н., Агуф И.А. Массоперенос в гелеобразном электролите герметичных свинцовых аккумуляторов // Сб. науч. трудов ВНИАИ. — Л.: Энергоатомиздат, 1981. — С. 13–18.
101. Нижниковский Е.А., Каневский Л.С., Фрольченков В.В. Импедансный метод диагностики химических источников тока и его использование для контроля состояния тионилхлоридно-литиевых элементов типа ТЛ-1,2. // Электрохимия. 1998. — Т. 34. — № 7. — С. 716–721.

102. Рыбалка К.В., Бекетаева Л. А., Протасова Е.Л. Применение метода операционного импеданса для оценки степени заряда химических источников тока. Свинцовый аккумулятор // Электрохимия. — 1996. — Т. 32. — № 6. — С. 689–693.
103. Гончаров В.И. Вещественный интерполяционный метод синтеза систем автоматического управления. — Томск: Изд. ТПУ, 1995. — 108 с.
104. Goncharov Valery, Liepinsh Andrew, Rudnitsky Wladislav. System Identification based on the Real Interpolation Method. Proceedings of the 14th International Conference on Systems Science. 11–14 September 2001, Wroclaw, Poland. — Vol. 1. — P. 234–238.
105. Hagglund T., Aström K.J. A frequency domain approach to adaptive control // 11 th IFAC World Congress, Tallin August 13–17, 1990. — Vol. 4. — P. 265–276.
106. Jianhua P., de Vegte J. Computer aided design of control system using nonparametric model // Automatica. — 1991. — 27. — № 5. — P. 865–868.
107. Белихмайер М.Я., Гончаров В.И. Синтез корректирующих устройств систем автоматического управления на основе равномерного приближения // Автоматика и телемеханика, 1997. — № 5. — С. 3–11.
108. Гончаров В.И., Лиепиньш А.В., Рудницкий В.А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Изв. АН. Теория и системы управления. — 2001. — № 4. — С. 36–43.
109. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А. Воронова и И.А. Огурка. — М.: Наука, 1984. — 344 с.
110. Лиепиньш А.В. Синтез регуляторов с автоматической настройкой в момент включения системы: дис... канд. техн. наук. — Томск, 2001. — 151 с.
111. Киселев О.Н., Поляк Б.Т. Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H^2 и по критерию максимальной робастности // Автоматика и телемеханика. — 1999. — №3. — С. 119–130.
112. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Международный симпозиум по робастному управлению // Автоматика и телемеханика. — 1993. — № 1. — С. 185–187.
113. Цыпкин М.И., Гольдинер А.Я., Тюляков К.А. Режимы работы и определение оптимальной мощности ДЭС в системе «ДЭС-ИБП» / <http://www.electrosystems.ru>.
114. Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. — М.:Эко-Трендз, 2002. — 280 с.

115. Гарганеев А.Г., Шаталин М.В., Шурыгин Ю.А. Контроль режимов и параметров систем бесперебойного электропитания ответственных потребителей // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов: Сб. трудов НИИ АЭМ / под ред. Ю.А. Шурыгина. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — С. 3–12.
116. Гарганеев А.Г., Шаталин М.В., Шурыгин Ю.А. Построение распределенной среды управления для системы бесперебойного электропитания сетевого вычислительного комплекса // Информатика и системы управления: сб. научн. трудов под ред. Б.П. Соустина. — Красноярск. — Вып. 5. — 2000. — 262 с.
117. Battery servicing, monitoring and management services available // Eur. Power News. — 1997. — 22. — № 2. — P. 20.
118. Carica e monitoraggio di batterie // Elettron cggi. — 1996. — № 212. — P. 89–95.
119. Life insurance for your battery back UP // Eur.Power News. — 1996. — Vol. 21 — .№ 5. — P. 23.
120. Battery monitoring modules introduced // Eur. Power News. — 1996. — Vol. 21. — № 1. — P. 27.
121. Пат. № 5458991 (США). Источник бесперебойного электропитания с автоматическим тестированием / Severinsky A.J. // Оpubл. 11.10.95.
122. Batteries get their heads together/ Batteries Int. — 1996. — № 27. — P. 42–43.
123. Wade M., Chew A., Geraghty F. Monitoring battery perfomance in remotearea power-supply (RAPS) systems. // J. Power Sources. — 1991. — Vol. 75. — № 4. — P. 421–430.
124. Rasmussen I., Feyk C., Boggia R., Horowitz B., Fink T., Struve G., Damsky B. Monitoring system for lead-acid wet cell station batteries / Proc. Amer. conf. — Vol. 56. — Pt. 2. — Chicago, 1994. — P. 1235–1240.
125. Fischer D. Nicht schatzen — sondern messen // Drive and cont. — 1996. — Vol. 6. — № 3. — P. 14.
126. Kebschell J. «EKG» fur USV-Batterien // Elek. Energ. — Techn. — 1996. — Vol. 41. — № 6. — P. 34.
127. Руководство по эксплуатации Open Comms Web Card / www.libert.com.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	5
1.1. Ответственные потребители электрической энергии. Общая характеристика функционирования промышленных сетей	5
1.1.1. Ответственные медицинские электроприборы и особенности работы экстренных медицинских отделений	9
1.1.2. Наземная аппаратура, ответственная за движение транспорта	28
1.1.3. Аппаратура ответственной корабельной автоматики ..	30
1.1.4. Аппаратура и ответственные электромеханические устройства взрыво- и пожароопасных производств ..	31
1.1.5. Современные коммуникационные системы	32
1.1.6. Электроприемники промышленных объектов газовой промышленности	34
1.2. Требования стандартов к качеству электропитания	35
Глава 2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ	41
Глава 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СБЭП	63
3.1. Общие положения	63
3.2. Разновидности алгоритмов ШИМ, применяемых в СБЭП ..	66
3.3. Фильтрация выходного напряжения в СБЭП	81
Глава 4. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	98
4.1. Общие сведения	98
4.2. Кислотные аккумуляторы	98
4.3. Щелочные аккумуляторы	102
4.4. Пожаровзрывоопасность АБ	103
4.5. Методы заряда аккумуляторных батарей	108
4.5.1. Методы заряда свинцово-кислотных аккумуляторов с циклом кислородной рекомбинации	108
4.5.2. Методы заряда никель-кадмиевых аккумуляторов ..	110

4.6. Природа полного внутреннего сопротивления и математическое представление АБ	110
4.7. Информативные свойства автономных инверторов в СБЭП переменного тока	129
Глава 5. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СБЭП В ЗАРЯДНЫХ И РАЗРЯДНЫХ РЕЖИМАХ АБ	137
Глава 6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ СТАНЦИЕЙ	151
Глава 7. МОНИТОРИНГ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	178

Учебное издание

ГАРГАНЕЕВ Александр Георгиевич

СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Учебное пособие

Научный редактор *доктор технических наук,
профессор А.Г. Гарганеев*

Выпускающий редактор *Т.С. Савенкова*

Редактор *О.Н. Свинцова*

Компьютерная верстка *В.П. Аршинова*

Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 00.12.2010. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 11,05. Уч.-изд. л. 10,0.

Заказ 0000-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, www.tpu.ru